

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

**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM  
SISTEMAS DE ARMAS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**GUERRA DE MINAS: a introdução dos veículos submarinos não tripulados na guerra de minas e uma análise acústica comparativa do AUV REMUS 100 em relação à navio-varredor**



**1º Ten MATHEUS DIAS DA SILVA RODRIGUES**

**Rio de Janeiro  
2023**

1º Ten MATHEUS DIAS DA SILVA RODRIGUES

GUERRA DE MINAS: a introdução dos veículos submarinos não tripulados na guerra de minas e uma análise acústica comparativa do AUV REMUS 100 em relação à navio-varredor

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

Orientador:

CT Paulo Ricardo Machado Costa

Coorientadores:

Prof. Beatriz Alencar Ribeiro, M.Sc.

1T (QC-CA) Rodrigo Scarabotto Godinho

CIAA  
Rio de Janeiro  
2023

1º Ten MATHEUS DIAS DA SILVA RODRIGUES

GUERRA DE MINAS: a introdução dos veículos submarinos não tripulados na guerra de minas e uma análise acústica comparativa do AUV REMUS 100 em relação à navio-varredor

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

Aprovada em \_\_\_\_\_

Banca Examinadora:

CMG (Ref) Luiz Antonio Carvalho - CIAA \_\_\_\_\_

CC Daniel Gama De Sousa - CIAA \_\_\_\_\_

Prof. Beatriz Alencar Ribeiro, M.Sc. - CIAA \_\_\_\_\_

CT Paulo Ricardo Machado Costa - CAAML \_\_\_\_\_

1T (QC-CA) Rodrigo Scarabotto Godinho - CASOP \_\_\_\_\_

CIAA  
Rio de Janeiro  
2023

Dedico esse trabalho ao Nobre  
Guerreiro Aeronaval João Manoel.  
Que desde 1954 respira a Marinha do  
Brasil.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, em primeiro lugar, por conceder-me fôlego de vida, capacitar-me na busca do conhecimento e ser meu escudo em meio a tantas lutas.

Agradeço a minha família, especialmente, minha esposa Juliana Rodrigues, que a cada momento que passo na minha carreira está ao meu lado me dando forças, sendo uma mulher forte e batalhadora. Que sustentou toda minha falta de disponibilidade, no decorrer do ano, para que eu me dedicasse ao curso e todos os dias perfeitos de viagem na Amazônia. Obrigado por ser esse pilar na minha vida.

A toda família Silva e Rodrigues, em especial ao meu avô João Manoel, meu norte de carreira naval e de vida. Sempre me motivando a cada dia a ser um melhor oficial e servo do Senhor. Minha mãe, Wania Dias, sempre me incentivando a estudar e sendo a motivadora dos melhores finais de semanas desse ano. Agradeço à minha tia Maria José e ao meu tio Jorge, que estão sempre desejando o melhor para mim.

Agradeço aos meus amigos Audir Lucas, Jonatan Souza, Rodrigo Grunewald, Marcus Sanches, Gioliano Braga, Renan Pereira e Renan Vieira, que foram motivadores para que eu buscasse superar meus limites no Aperfeiçoamento.

Gratidão à Marinha do Brasil que me proporciona crescimento intelectual ao realizar um curso deste nível, me tornando um profissional mais bem capacitado a desempenhar minhas funções a bordo.

Agradeço ao meu orientador, o CT Ricardo Costa, aos coorientadores Prof. M.Sc. Beatriz Alencar e 1T (QC-CA) Scarabotto por me apoiarem desde o projeto inicial que pensei para o TCC e estarem sempre disponíveis para mitigar qualquer dúvida, sempre me dando a proa certa a navegar.

Agradeço ao CMG (RM1) Asch, por todas as orientações prestadas, toda paciência ao receber os oficiais-alunos em sua sala e por ser um coordenador que zela pela justiça e imparcialidade. Seu exemplo será perpetuado pelas próximas gerações que adentrarem na MB.

Por fim, gostaria de agradecer a todos que dividiram os conveses comigo no “Pirarucu da Amazônia”, saudoso NAsH, que permitiu-me crescer como oficial e como pessoa.

*“Far better it is to dare mighty things, to win glorious triumphs, even though checkered by failure, than to take rank with those poor spirits who neither enjoy much nor suffer much, because they live in the gray twilight that knows neither victory nor defeat.”*

*Theodore Roosevelt*

GUERRA DE MINAS: a introdução dos veículos submarinos não tripulados na guerra de minas e uma análise acústica comparativa do AUV REMUS 100 em relação à navio-varredor

## Resumo

A Guerra de Minas é uma atividade antiga que remonta ao século XVI na China. Ela é subdividida em duas categorias de operações: a de minagem e a de contramedidas de minagem. Essa atividade recebe relativamente pouca atenção da mídia especializada. No decorrer da evolução das minas marítimas, foram necessárias uma evolução das doutrinas e dos meios de contramedidas. Destaca-se o surgimento da doutrina de caça de minas, retirando os navios do campo minado reduzindo os riscos à vida humana. Após a ascensão dessa doutrina houve a introdução dos veículos não tripulados nas contramedidas de minagem, destacando-se os veículos submarinos não tripulados. A introdução desses veículos na guerra de minas representa um avanço significativo em termos de táticas e operações militares. Especificamente, o veículo autônomo REMUS 100, que se destaca em comparação com os navios-varredores. Essa superioridade se deve à capacidade do REMUS 100 de realizar missões de desminagem de maneira autônoma, permitindo que as forças militares reduzam o risco humano e operem de forma discreta em áreas perigosas. Além disso, o REMUS 100 é altamente versátil e eficiente na coleta de informações. Em contraste, os navios-varredores requerem tripulações significativas e apresentam desafios de exposição ao risco em áreas minadas. Complementarmente, esses veículos também possuem vantagens acústicas ante a um navio-varredor. São mais silenciosos e furtivos, tendo uma área de segurança para acionamento de uma mina acústica menor que os navios-varredores, sendo essa análise comprovada através de uma simulação neste trabalho. Portanto, a introdução do REMUS 100 traz vantagens táticas e operacionais ao permitir a execução de missões de contramedidas de minagem de maneira mais segura e eficaz, melhorando assim a eficiência das operações militares no combate às minas navais. Cabe a Marinha do Brasil operacionalizar o REMUS 100, para contramedidas de minagem. Assim, reduzindo custos de manutenção e logístico para essa atividade importante para a manutenção da soberania nacional. Salienta-se que a Marinha do Brasil está projetando o primeiro veículo submarino autônomo brasileiro para atuar em contramedidas de minagem. Por fim, as Fragatas Classe “Tamandaré” irão contar com uma modularidade, permitindo o lançamento desses veículos.

Palavras-chave: Guerra de Minas. Veículos Não Tripulados. REMUS 100. Marinha do Brasil.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Imagem ilustrativa de um CM formado por minas de fundeio.	20
Figura 2 -	Militares da USN transportando esferas de minas do armazém para o galpão de montagem em 1919.	22
Figura 3 -	<i>Bushnell's Keg.</i>	23
Figura 4 -	<i>The Battle of Kegs.</i>	24
Figura 5 -	Mina derivante.	27
Figura 6 -	Classificação das minas navais.	28
Figura 7 -	Mina explodindo a partir de uma varredura de influência.	30
Figura 8 -	Paravane.	33
Figura 9 -	NCM Classe " <i>Lerici</i> ", da Marinha italiana.	37
Figura 10 -	Martelo acústico GBT-3 da MB.	38
Figura 11 -	Esquema de Varredura de Influência Magnética com HFG-18.	39
Figura 12 -	Na esquerda, o Navio Mineiro Classe "Carioca"; no centro, o NV Classe "Javari"; e na direita, o NV Classe "Aratu".	42
Figura 13 -	NCMM Classe " <i>Koster</i> " e seus sistemas de CMM.	44
Figura 14 -	ROV Mohawk realizando missão de coleta de dados oceânicos.	46
Figura 15 -	REMUS 6000.	49
Figura 16 -	Ilustração de um sistema de SSS.	54
Figura 17 -	Com o SSS (à esquerda), cada pulso mede uma área distinta e separada do fundo do mar. Em contraste, os pulsos do SAS (direita) se sobrepõem uns aos outros e medem cada área mais de uma vez. Isso aumenta artificialmente o alcance da matriz.	55
Figura 18 -	DVL.	56
Figura 19 -	AUV realizando navegação baseada em sistemas de posicionamento acústico.	58
Figura 20 -	Reflectância de Água Clara e de Água com Algas em relação ao comprimento de onda eletromagnética.	59
Figura 21 -	Sensores de Navegação de um AUV.	60
Figura 22 -	Ilustração de uma operação de CMM com UUVs.	65
Figura 23 -	<i>Kill chain</i> usada na caça de minas com UUVs.	69
Figura 24 -	<i>Kill chain</i> usada na varredura com UUVs.	70



Figura 25 -	REMUS 100.	71
Figura 26 -	Ilustração do AUV brasileiro projetado pelo IPqM.	75
Figura 27 -	Modularidade da FCT.	76
Figura 28 -	Análise em Banda Larga – 1/3 de oitava.	83
Figura 29 -	Análise em Banda Estreita – DEMON.	83
Figura 30 -	Comparação entre ruído de banda larga (BB) e ruído de banda estreita (NB).	85
Figura 31 -	Espectro de Welch, 10 - 600 Hz, de NV.	86
Figura 32 -	Espectro de Welch, 10 – 10.000 Hz, de NV.	86
Figura 33 -	Espectro de Welch, 10 – 600 Hz, tons característicos de NV.	87
Figura 34 -	Espectro em 1/3 de oitava – NV.	88
Figura 35 -	Espectro de Welch, 10 - 600 Hz, de AUV – tipo REMUS 100.	89
Figura 36 -	Espectro de Welch, 10 – 10.000 Hz, de AUV – tipo REMUS 100.	89
Figura 37 -	Espectro de Welch, 10 -10.000 Hz, tons característicos de AUV – tipo REMUS 100.	90
Figura 38 -	Espectro em 1/3 de oitava – AUV.	91
Figura 39 -	Espectro de Welch, 10 – 600 Hz, do ruído ambiente.	92
Figura 40 -	Espectro de Welch, 10 – 10.000 Hz, do ruído ambiente.	93
Figura 41 -	Espectro em 1/3 de oitava do ruído ambiente.	93
Figura 42 -	Espectro em 1/3 de oitava do ruído ambiente e seus PSD.	94
Figura 43 -	Campo de Pressão Acústico[dB/km] e TL@25m [dB/km].	96
Figura 44 -	Alcance da perda na transmissão [dB/m].	96
Figura 45 -	Baía de Guanabara – Área utilizada para calcular a propagação acústica.	97
Figura 46 -	Situação de contorno dos meios e da mina acústica.	99
Figura 47 -	Perdas na Transmissão, NV, SL = (139,02 [dB]; 86,98 [Hz]).	99
Figura 48 -	Perdas na transmissão, NV, SL = (137,65 [dB]; 355,92 [Hz]).	100
Figura 49 -	Perdas na transmissão, AUV, SL = (119,11 [dB]; 52,15 [Hz]).	100
Figura 50 -	Perdas na transmissão, AUV, SL = (108,08 [dB]; 1217,64 [Hz]).	100
Figura 51 -	Perdas na transmissão, AUV, SL = (95,93 [dB]; 1250 [Hz]).	101
Figura 52 -	Perdas na transmissão, AUV, SL = (114,89 [dB]; 50 [Hz]).	101
Figura 53 -	Perdas na transmissão, AUV, SL = (99,44 [dB]; 160 [Hz]).	102
Figura 54 -	Perdas na transmissão, NV, SL = (126,88 [dB]; 160 [Hz]).	102
Figura 55 -	Perdas na transmissão, NV, SL = (126,69 [dB]; 400 [Hz]).	102

Figura 56 - Perdas na transmissão, NV, SL = (130,64 [dB]; 80 [Hz]).

103

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Classificação dos UUVs por peso e autonomia energética.	51
Tabela 2 -	Classificação dos UUVs por propulsão.	51
Tabela 3 -	Classificação dos UUVs por suas operações.	52
Tabela 4 -	Níveis de autonomia dos UUVs.	61
Tabela 5 -	Missões e relevância dos UUVs no Campo Comercial e Científico.	62
Tabela 6 -	Missões e relevância dos UUVs no Campo Militar e Características das Missões.	63
Tabela 7 -	Tons característicos, em banda estreita, de NV.	87
Tabela 8 -	Bandas características, em Banda Larga, de NV.	88
Tabela 9 -	Caracterização acústica - em banda larga e estreita - de NV.	88
Tabela 10 -	Tons característicos, em banda estreita, de AUV – tipo REMUS 100.	90
Tabela 11 -	Bandas características, em banda larga, do AUV REMUS 100.	91
Tabela 12 -	Caracterização acústica em banda larga e estreita - de AUV.	92
Tabela 13 -	Caracterização acústica em banda larga e estreita do ruído ambiente	94
Tabela 14 -	Dados climatológicos inseridos na caracterização ambiental do SISPRES.	95
Tabela 15 -	TL a serem calculadas para o NV.	98
Tabela 16 -	TL a serem calculadas para o AUV.	98
Tabela 17 -	d(TL), em [m] calculadas para o NV.	103
Tabela 18 -	d(TL), em [m] calculadas para o Navio AUV.	103

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA	Amazônia Azul
AJB	Águas Jurisdicionais Brasileiras
AMRJ	Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro
ATP	Trifosfato de Adenosina
AUSI	<i>Autonomous Undersea System Institute</i>
AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>
BNA	Base Naval de Aratu
BSIM	Base de Submarinos da Ilha da Madeira
CHM	Centro de Hidrografia da Marinha
CM	Campo Minado
CMM	Contramedidas de Minagem
ComemCh	Comando em Chefe da Esquadra
ComForMinVar	Comando da Força de Minagem e Varredura
Com1DN	Comando do 1º Distrito Naval
Com2DN	Comando do 2º Distrito Naval
CN3	<i>Communication / Navigation Network Node</i>
DAE	Desativação de Artefatos Explosivos
DEMON	<i>Detection of Envelope Modulation on Noise</i>
DGPS-HiPAP	<i>Differential GPS-High Precision Acousting Position</i>
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
DMN	Doutrina Militar Naval
DN	Distritos Navais
DoD	<i>U.S. Department of Defense</i>
DVL	<i>Doppler Velocity Log</i>
EGN	Escola de Guerra Naval
EUA	Estados Unidos da América
FATEC	Faculdade de Tecnologia de São Paulo
FCT	Fragata Classe 'Tamandaré'
FEMAR	Fundação de Estudos do Mar
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
FLS	<i>Front-Looking Sonar</i>

ForMinVar	Força de Minagem e Varredura
GAAGueM	Grupo de Avaliação e Adestramento de Guerra de Minas
GM	Guerra de Minas
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GTGM	Grupo de Trabalho de Guerra de Minas
IMCMS	<i>Integrated Mine Countermeasures System</i>
IPqM	Instituto de Pesquisas da Marinha
IPB	<i>Intelligence Preparation of the Battlespace</i>
ISR	<i>Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance</i>
LBL	<i>Long Baseline</i>
MB	Marinha do Brasil
MCM	<i>Mine Countermeasures</i>
MRU	<i>Motion Reference Unit</i>
NCM	Navios Caça-Minas
NCMM	Navios de Contramedidas de Minagem
NVs	Navios-Varredores
OM	Organizações Militares
ONU	Organização das Nações Unidas
OPN	Operações Navais
OTAN	Organização do Tratado do Atlântico Norte
PN	Poder Naval
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
REMUS	<i>Remote Environmental Monitoring Units</i>
RFI	<i>Request For Information</i>
RN	<i>Royal Navy</i>
ROV	<i>Remotely Operated Underwater Vehicle</i>
SAS	<i>Synthetic Aperture Sonar</i>
SBL	<i>Short Baseline</i>
SISPRES	Sistema de Previsão do Ambiente Acústico
SL	<i>Source Level</i>
SLOC	<i>Sea Lines of Communication</i>
SNI	Sistema de Navegação Inercial

SNR	<i>Signal-Noise Ratio</i>
S/N	<i>Serial Number</i>
SN-BR	Submarino Nuclear Brasileiro
SPURV	<i>Special Purpose Underwater Research Vehicle</i>
SSS	<i>Side-Scan Sonar</i>
TL	<i>Transmission Loss</i>
TON	Teatro de Operações Navais
TRACEO	Traçado de Raio por Modelo de Propagação Acústica
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
USBL	<i>Ultra Short Baseline</i>
USN	<i>United States Navy</i>
USP	Universidade de São Paulo
USV	<i>Unmanned Surface Vehicle</i>
UUVs	<i>Unmanned Underwater Vehicles</i>
XLUUV	<i>Extra Large Unmanned Undersea Vehicles</i>
ZEE	Zona Econômica Exclusiva

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Apresentação do Problema.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa e Relevância.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>16</b>
1.3.1	Objetivo Geral.....	16
1.3.2	Objetivos Específicos.....	16
<b>1.4</b>	<b>Etapas do Trabalho.....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>A GM.....</b>	<b>19</b>
2.1.1	Desenvolvimento Histórico da Mina Naval.....	22
2.1.2	Classificação das Minas Navais.....	26
2.1.2.1	<i>Posição na coluna d'água.....</i>	<i>27</i>
2.1.2.2	<i>Método de atuação.....</i>	<i>29</i>
2.1.2.3	<i>Método de lançamento.....</i>	<i>30</i>
2.1.3	As Operações de Minagem e CMM.....	31
2.1.3.1	<i>Divisão das operações de CMM.....</i>	<i>32</i>
2.1.3.2	<i>A evolução da doutrina e dos meios utilizados.....</i>	<i>33</i>
2.1.3.3	<i>Do NV ao Navio de CMM.....</i>	<i>34</i>
2.1.3.4	<i>O emprego de veículos não tripulados.....</i>	<i>40</i>
2.1.4	A MB no Âmbito da GM.....	40
<b>2.2</b>	<b>Unmanned Underwater Vehicles (UUVs).....</b>	<b>45</b>
2.2.1	História Cronológica do Desenvolvimento dos AUV.....	46
2.2.2	Classificação dos UUVs.....	50
2.2.3	Os principais componentes dos UUVs - Sensores.....	52
2.2.3.1	<i>Sonar.....</i>	<i>53</i>
2.2.3.1.1	<i>Side-Scan Sonar (SSS) e Synthetic Aperture Sonar (SAS).....</i>	<i>54</i>
2.2.3.1.2	<i>Front-Looking Sonar (FLS).....</i>	<i>55</i>
2.2.3.2	<i>Doppler Velocity Log (DVL).....</i>	<i>56</i>
2.2.4	Navegação dos AUVs.....	57
2.2.5	Autonomia.....	60
2.2.6	Aplicações dos UUVs.....	61

2.2.6.1	<i>Campo Comercial e Científico</i> .....	62
2.2.6.2	<i>Campo Militar</i> .....	62
<b>2.3</b>	<b>O Binômio UUV e GM</b> .....	<b>63</b>
2.3.1	CMM com UUVs.....	65
2.3.1.1	<i>Estratégia de Operações</i> .....	67
2.3.2	Autonomia nas Kill Chains Existentes em CMM com UUVs.....	68
2.3.2.1	<i>Atuais Kill Chains de Caça de Minas</i> .....	69
2.3.2.2	<i>Atuais Kill Chains de Varredura de Minas</i> .....	70
2.3.3	CMM com UUVs na Operação Iraqui Freedom.....	71
<b>2.4</b>	<b>A Integração de UUVs à MB</b> .....	<b>72</b>
2.4.1	O VSA REMUS 100 na MB.....	73
2.4.2	O Desenvolvimento do AUV Brasileiro.....	74
2.4.3	Lançamento dos UUVs a partir da FCT.....	76
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>78</b>
<b>3.1</b>	<b>Classificação da Pesquisa</b> .....	<b>78</b>
3.1.1	Quanto aos fins.....	78
3.1.2	Quanto aos meios.....	78
<b>3.2</b>	<b>Limitações do Método</b> .....	<b>79</b>
<b>3.3</b>	<b>Universo de Amostragem</b> .....	<b>80</b>
<b>3.4</b>	<b>Coleta e Tratamento de Dados</b> .....	<b>80</b>
<b>4</b>	<b>DESCRIÇÃO E ANÁLISE ACÚSTICA COMPARATIVA ENTRE AUV REMUS 100 E NV GENÉRICO</b> .....	<b>82</b>
<b>4.1</b>	<b>Descrição</b> .....	<b>82</b>
4.1.1	Caracterização acústica.....	84
4.1.2	NV.....	85
4.1.3	AUV.....	89
4.1.4	Ruído ambiente.....	92
4.1.5	Propagação Acústica na Área de Interesse.....	94
<b>4.2</b>	<b>Resultados</b> .....	<b>97</b>
4.2.1	Local do experimento.....	97
4.2.2	Perdas na Transmissão.....	98
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>105</b>
5.1	Considerações Finais.....	106



5.2	Sugestões para Futuros Trabalhos.....	107
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>108</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A Guerra de Minas (GM) é uma prática naval que ocorre há muito tempo, caracterizada por sua notável sofisticação na atualidade. Por definição, é o uso estratégico, operacional ou tático de minas navais e de suas contramedidas. Do ponto de vista doutrinário, a GM é subdividida em duas categorias:

- Operações de Minagem;
- Operações de Contramedidas de Minagem (CMM).

Apesar de ser uma atividade significativa, a Guerra de Minas (GM) recebe relativamente pouca atenção na mídia especializada, se comparada a outras operações navais. As minas são dispositivos explosivos, traiçoeiros e passivos ao permanecerem ocultos. Eles possuem a capacidade de causar danos devastadores, que afeta tanto os meios navais no campo minado (CM) quanto a economia de uma nação. Assim evidencia sua imponente força no campo de batalha, a GM não pode ser negligenciada, mas sim temida e respeitada (Vogt, 2019b).

Desde o advento da produção de minas marítimas na China no século XVI até os tempos contemporâneos, observa-se uma significativa sucessão de avanços tecnológicos e aprimoramentos nesses dispositivos. Essa evolução contínua reflete a busca incessante por estratégias mais eficientes de defesa e ataque, impulsionada pela constante inovação militar e pela adaptação às mudanças nas táticas navais e ameaças emergentes. Ao longo dos séculos, as minas marítimas evoluíram não apenas em termos de letalidade e eficácia, mas também na sofisticação de seus sistemas de detecção e desativação, representando um campo dinâmico e crucial no cenário da guerra naval. Nesse contexto, é necessário reconhecer que tanto a doutrina quanto as estratégias e os meios de CMM tiveram que se adaptar e progredir em resposta a essas inovações.

Nota-se a evolução dos tipos de embarcações envolvidas nas operações de CMM. No entanto, devido ao rápido progresso das minas navais, resultando em um aumento da furtividade e da capacidade desses artefatos para se contraporem às CMM existentes à época, emergiu uma priorização da segurança do pessoal e material. Isso culminou na imperativa necessidade de manter navios e tripulações em distância segura das áreas minadas.

Como resultado dessa nova abordagem, surgiu um estágio inovador na Guerra Naval, marcado pela integração de veículos não tripulados nas operações. Dentre esses veículos, destaca-se o uso dos *Unmanned Underwater Vehicles*<sup>1</sup> (UUVs), uma categoria de submarinos

---

<sup>1</sup> *Unmanned Underwater Vehicles* – Veículos Submarinos Não Tripulados, tradução nossa.

não tripulados cuja primeira versão foi desenvolvida na década de 1950. Os "drones submarinos" passaram por uma série de modernizações desde sua concepção inicial, sendo atualmente classificados com base em diversos parâmetros. Essas modernizações incluem melhorias na autonomia, capacidade de mergulho, eficiência energética e a incorporação de tecnologias avançadas de sensoriamento, proporcionando uma significativa evolução desde sua primeira versão. Suas aplicações abrangem desde contextos comerciais até militares, mostrando sua adaptabilidade a diferentes cenários e missões. Equipados com uma variedade de sensores de última geração, esses veículos não tripulados foram aprimorados para operar em ambientes extremamente hostis. Como exemplo dessas áreas: Profundidades Oceânicas Extremas, onde podem explorar áreas submarinas profundas, onde a pressão é intensa e as condições ambientais são desafiadoras; Regiões Árticas e Antárticas, sendo capazes de funcionar em águas geladas, suportando baixas temperaturas e possíveis obstáculos relacionados ao gelo; Áreas de Conflito ou Zonas de Guerra, sendo utilizados em operações militares em áreas de conflito, onde as condições podem ser imprevisíveis e perigosas.

Os UUVs provaram sua eficácia em operações de CMM durante a *Operação Iraqi Freedom* no início dos anos 2000, surgindo como a solução mais eficiente para detecção, varredura e caça de minas. Todas essas vantagens vêm acompanhadas de um custo de aquisição e operação mais baixo, salvaguardando a vida humana. Dessa forma, os UUVs se consolidaram como a abordagem ideal para operações em áreas de conflito.

De acordo com a norma do *U.S. Department of Defense*<sup>2</sup> (DoD) (DoD, 2004, tradução nossa), as operações de CMM com UUVs são conduzidas em diversos ambientes marinhos e subdivididas em missões específicas. As operações de caça de minas e varredura com esses veículos passam por múltiplas etapas até alcançar o resultado desejado, utilizando as *kill chains*<sup>3</sup>.

No âmbito da Marinha do Brasil (MB), o primeiro contato com a GM remonta à Guerra do Paraguai, ocorrida no final do século XIX. Desde então até os tempos atuais, observa-se uma evolução contínua nas capacidades e estratégias empregadas pela MB no contexto da GM. Ao longo desse período, várias evoluções marcaram o cenário da GM na MB. Algumas dessas evoluções incluem:

**Modernização Tecnológica:** Integração de tecnologias avançadas para detecção, neutralização e desativação de minas, contribuindo para a eficácia das operações.

---

<sup>2</sup> *U.S. Department of Defense* – Departamento de Defesa dos Estados Unidos, tradução nossa.

<sup>3</sup> *Kill chains* – O termo *Kill Chain* refere-se à sequência de eventos necessários para chegar a um efeito de combate. A tradução nossa é Cadeias da Morte (Martin *et al.*, 2019, tradução nossa).

**Diversificação de Meios:** Incorporação de diferentes classes de navios-varredores, capazes de lidar com ameaças submarinas de forma mais eficiente.

**Treinamento e Capacitação:** Investimento contínuo em treinamento e capacitação das tripulações, aprimorando suas habilidades para enfrentar desafios específicos relacionados à GM.

**Cooperação Internacional:** Participação em exercícios e parcerias internacionais, permitindo a troca de conhecimentos e experiências no campo da Guerra.

Porém, os navios-varredores (NVs) da classe 'Aratu', que se encontram em serviço ativo, foram incorporados à armada na década de 1970 e estão obsoletos, mesmo após passarem por uma revitalização em 2001, a qual estendeu seu ciclo de vida útil. Entretanto, há a intenção de aquisição de novos navios de superfície para substituição dos atuais meios.

No que se refere à introdução dos UUVs na MB, mesmo diante das restrições orçamentárias que afetam as Forças Armadas em relação a investimentos em tecnologia, é relevante destacar alguns desenvolvimentos significativos. Em 2015, em convênio com outras instituições, a MB adquiriu o *Autonomous Underwater Vehicle*<sup>4</sup> (AUV) *Remote Environmental Monitoring Units*<sup>5</sup> (REMUS) 100, destinado a fins hidroceanográficos. No entanto, logo foram evidenciadas as limitações desse veículo para tais tarefas.

Dessa forma, emerge a possibilidade de empregar esses veículos, que já demonstraram sua eficácia em operações de CMM no Iraque, para fins semelhantes no âmbito da MB.

Ademais, é importante mencionar que o Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM) está atualmente desenvolvendo o primeiro UUV de fabricação brasileira voltado para operações de CMM, com previsão de conclusão em 2028. Ressalta-se que esses veículos poderão ser lançados a partir da Fragata Classe 'Tamandaré' (FCT), devido à modularidade que será oferecida por essa belonave.

## 1.1 Apresentação do Problema

A necessidade de investimentos em CMM para a MB pode ser problematizada por diversos motivos:

- **Segurança Marítima:** A minagem de áreas costeiras e portuárias representa uma ameaça significativa à segurança marítima. Investir em CMM pode ajudar a proteger a

---

<sup>4</sup> *Autonomous Underwater Vehicle* – Veículo Submarino Autônomo, tradução nossa.

<sup>5</sup> *Remote Environmental Monitoring Units* – Unidade de Monitoramento Ambiental Remoto, tradução nossa.

soberania territorial, garantindo a livre circulação de navios e evitando possíveis danos à infraestrutura portuária e às embarcações.

- **Proteção das Riquezas Nacionais:** O Brasil possui uma extensa Zona Econômica Exclusiva (ZEE) rica em recursos naturais, como petróleo, gás, e minerais marinhos.

Dada a importância estratégica desses recursos para o desenvolvimento do país, é fundamental investir em CMM para garantir sua proteção contra possíveis ataques ou sabotagens.

- **Cooperação Internacional:** O Brasil tem participado cada vez mais em missões de paz e segurança no âmbito da Organização das Nações Unidas (ONU). O investir em CMM, a MB pode estar preparada para enfrentar ameaças em operações internacionais e ajudar a garantir a estabilidade e a segurança dos mares e águas interiores em conjunto com outros países.

- **Fortalecimento da Indústria Nacional:** Investir em CMM requer aquisição de tecnologia e desenvolvimento de capacidades específicas. Isso pode impulsionar a indústria nacional, estimulando a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias avançadas, bem como a criação de novos postos de trabalho.

- **Treinamento e Capacitação:** Investir em CMM também envolve o treinamento e a capacitação de pessoal especializado. Isso pode proporcionar oportunidades de aprendizado e crescimento para os profissionais da MB, aumentando sua expertise e eficácia em lidar com ameaças de minagem.

Ao problematizar a necessidade de investimentos em CMM, fica evidente que essa é uma demanda importante para a MB, tendo em vista a segurança marítima, a proteção dos recursos naturais, a cooperação internacional, o fortalecimento da indústria nacional e o treinamento e capacitação de seus membros.

A mera suposição de que uma área marítima tenha a presença de minas, já impõe aos navios evitá-la. Desta forma, causando impactos socioeconômicos, interrompendo as rotas comerciais e a cadeia de abastecimento, devido à interrupção das rotas marítimas seguras. A violação das linhas de abastecimento de um país tem como consequência impactos graves em sua economia, mostrando o quão forte é o poder do emprego de minas com fins ofensivos. Um recente exemplo de desestabilização econômica, foi visto em fevereiro de 2022, quando a Rússia inviabilizou a navegação ucraniana, dos portos que são ligados ao Mar Negro, ao estabelecer um CM, onde eram escoadas 90% das exportações, sua principal rota. Estendendo esses impactos além das fronteiras da Ucrânia, por exemplo, aos países da União Europeia, os

quais são grandes importadores de grãos provenientes do território ucraniano (Hegarty, 2022; Vogt, 2020).

## 1.2 Justificativa e Relevância

A introdução de UUVs na GM é justificada pela necessidade de modernizar e aprimorar as operações militares, particularmente na desminagem de áreas marítimas minadas. O AUV REMUS 100 traz vantagens táticas e operacionais significativas, uma vez que é capaz de executar missões de CMM de maneira autônoma e eficiente, reduzindo o risco para as tripulações e operando em ambientes de alta periculosidade. Essa justificativa decorre da crescente complexidade das ameaças de minas submarinas e da necessidade de um método mais seguro e eficaz para identificação e neutralização dessas ameaças.

## 1.3 Objetivos

O presente estudo objetiva incentivar pesquisas no que diz respeito a “GUERRA DE MINAS: a introdução dos veículos submarinos não tripulados na guerra de minas e uma análise acústica comparativa do AUV REMUS 100 em relação à navio-varredor”, além de apresentar possíveis soluções para que a MB esteja preparada para os desafios bélicos da atualidade.

### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral consiste em realizar uma análise a respeito de como demonstrar a relevância da GM nas Operações Navais (OPN), ressaltando que a incorporação de UUVs nas CMM proporciona benefícios operacionais e táticos superiores em relação aos NVs.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

#### **Contextualização Histórica da GM:**

- Explorar as origens históricas da guerra
- Analisar as operações de minas

#### **Impacto Econômico e Militar das Minas Navais:**

- Discutir o poder econômico das minas navais e seus efeitos.
- Examinar como as minas causam danos em diferentes aspectos.

**Evolução das Doutrinas e Estratégias de Guerra:**

- Investigar as mudanças nas doutrinas e estratégias de guerra relacionadas às minas.

**Desenvolvimento das Embarcações:**

- Abordar o progresso no design e nas capacidades.
- Integração de UUVs nas Marinhas.

**Analisar a integração bem-sucedida de UUVs nas OPN:**

- Destacar a eficácia.

**GM na MB:**

- Investigar a história da GM na MB.

**Examinar a Aquisição de UUVs e o Desenvolvimento do AUV Brasileiro:**

- Detalhar a aquisição do UUV REMUS 100 pela MB.

**Projeto da FCT:**

- O lançamento de UUVs a partir da FCT.

**Vantagens Táticas e Operacionais dos AUVs em Comparação com o NV:**

- Analisar a descrição acústica do REMUS 100 e NV.
- Comparar a distância segura para operação do REMUS 100 e de um NV em um CM.

## 1.4 Etapas do Trabalho

Destarte, para que se permita a perfeita compreensão do desenvolvimento dessa pesquisa, o presente trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos, conforme a seguir:

**Capítulo 1:** Tem-se a Introdução com a apresentação do tema, onde foi explanado sobre a guerra de minas e as operações de minagem e CMM, o objetivo geral e específico do trabalho e sua relevância, e a justificativa da pesquisa.

**Capítulo 2:** Trata-se do Referencial Teórico onde foi efetuado a revisão da literatura e antecedentes do problema, analisando ideias de especialistas imprescindíveis para a compreensão do assunto fruto da presente pesquisa.

**Capítulo 3:** Metodologia, apresenta a classificação das modalidades de pesquisa, métodos e técnicas utilizadas para alcançar o objetivo desse experimento e que permitiram sua adequada conclusão, além de expor suas principais limitações.

**Capítulo 4:** Descrição e Análise dos Resultados, foi realizado nesse trabalho um experimento acústico utilizando técnicas avançadas de sensoriamento e processamento de sinais, demonstrando a clara vantagem do AUV REMUS 100 em relação aos NVs em operações de CMM.

**Capítulo 5:** Retomaremos os objetivos da pesquisa, a fim de efetuar uma verificação se foram plenamente atingidos. Então, serão comprovadas ou refutadas as hipóteses apresentadas e será verificados os resultados alcançados.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo tem por alicerce anunciar os conceitos imprescindíveis para o correto entendimento das seções subsequentes. Serão abordados conceitos e ideias necessários que permitam a compreensão adequada da Introdução dos Veículos Submarinos não Tripulados na Guerra de Minas: as vantagens táticas e operacionais do AUV REMUS 100 em relação à Navio-Varredor. Esse estudo fará uso de pesquisa bibliográfica exploratória associada à análise dos estudos apresentados para sua aplicabilidade no contexto naval.

### 2.1 A GM

Inicialmente, conforme o Glossário das Forças Armadas (Brasil, 2015), uma mina é definida como: Artefato utilizado para dificultar ou impedir o movimento de pessoas, veículos ou embarcações, contendo uma carga explosiva que, ao ser acionada, causa efeito letal ou lesivo. A mina marítima é definida pela Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN) como 'um dispositivo explosivo colocado na água, no leito do mar ou no subsolo, com a intenção de danificar ou afundar navios ou de impedir a navegação em uma área'. Assim, pode ser empregada para restringir o acesso do inimigo a áreas vulneráveis, bem como para confinar o inimigo em determinados locais. Na Figura 1 é ilustrado um CM formado por minas de fundeio (Dissanayake e Costa, 2023, tradução nossa).

As minas marítimas foram uma arma de grande importância no passado, principalmente nos conflitos do século XX. No século XXI observamos que as minas continuam desempenhando papel preponderante, mostrando, mesmo em situações limitadas, o seu potencial. Se empregada com sabedoria, essa arma pode ajudar de forma complementar três das quatro tarefas básicas do poder naval. O uso de minas, combinado com os demais meios da marinha, tornará o controle de área marítima e a negação de uso do mar mais efetivo (Senna, 2011, p.209).

Figura 1 - Imagem ilustrativa de um CM formado por minas de fundeio.



Fonte: Makichuck (2021).

A mina marítima, também conhecida como mina naval ou submarina, é um artefato explosivo empregado sob a superfície da água, que pode ser detonado por meio da sua colisão com o alvo ou por algum tipo de influência em seu mecanismo de disparo, como será detalhado nas próximas seções. Essas 'temíveis armas que esperam', mesmo quando são antigas e obsoletas, representam um desafio real para as Forças Navais envolvidas em operações expedicionárias. Sem dúvida, as marinhas em geral precisam cada vez mais considerar esses meios evidentes de negar o acesso como uma parte essencial de sua estratégia. Aproximadamente 50 marinhas em todo o mundo plantam minas, e 32 países estão envolvidos em sua produção, dos quais 24 realizam exportações (Smith, 2005, tradução nossa). Estima-se que apenas Coreia do Norte, Irã, China e Rússia possuam um estoque contendo cerca de 450 mil minas (Freedberg Jr., 2015, tradução nossa).

As minas navais são armas relativamente simples, de produção e armazenamento acessíveis, que não demandam rotinas complexas de manutenção. Além disso, o lançamento dessas minas em um teatro de operações navais (TON) não requer navios de alta complexidade tecnológica. Ao longo dos anos, a tecnologia empregada nas minas tem experimentado avanços significativos. As antigas minas de contato, amplamente utilizadas durante a Primeira Guerra

Mundial (1914-1918), hoje coexistem com minas equipadas com dispositivos eletrônicos modernos.

Esses avanços permitem uma capacidade precisa de discriminação do alvo e tornam possível a detecção de navios que realizam operações de CMM. Ao longo da história, as minas navais desempenharam e continuarão a desempenhar um papel crucial na guerra naval. Elas causam danos significativos às marinhas, retardam ou perturbam suas operações, prejudicam o comércio marítimo e forçam ajustes no planejamento estratégico e tático (Board *et al.*, 2001, tradução nossa). Após lançadas ao mar, as minas representam um grande perigo para qualquer tipo de embarcação, seja na superfície da água ou abaixo dela (Nações Unidas, 2013).

Segundo Woodward e Robinson (1993, tradução nossa):

Primeiramente, uma mina é um invólucro flutuante de ferro de tamanho considerável, que contém até mil libras de TNT. Isso, a propósito, é um pouco menos de meia tonelada de explosivo de alto poder, o suficiente para comprometer gravemente a integridade da maioria das embarcações. Se uma embarcação colidir com tal mina, mesmo que seja um choque superficial, ela certamente criará uma enorme abertura na embarcação, causando fatalidades a qualquer um que esteja próximo. Em geral, minas grandes, dispostas de maneira profissional, afundam navios rapidamente e de forma ruidosa. Elas flutuam abaixo da superfície da água, talvez a uma profundidade de dez a quinze pés, o suficiente para garantir que nunca possam ser vistas, mas próximas o bastante para que até embarcações de baixo calado possam colidir com elas (Woodward; Robinson, 1993, p.202, tradução nossa).

De acordo com Majumdar (2016, tradução nossa), as minas marítimas são vistas como uma das armas mais mortíferas do arsenal naval. Estes artefatos bélicos foram responsáveis por destruir e causar mais danos a navios da *United States Navy*<sup>6</sup>(USN), do que qualquer outro armamento. desde a Segunda Guerra Mundial (1939-1945). Na Figura 2 é apresentado o transporte de minas navais por militares da USN em 1919.

Devido seu baixo custo, e facilidade de produção e operação, as minas podem ser adquiridas por nações menos desenvolvidas economicamente, organizações criminosas ou até mesmo por grupos assimétricos (Majumdar, 2016, tradução nossa), gerando preocupação às autoridades, principalmente por colocar em risco os portos, costas e águas interiores (Vogt, 2019a). Adicionalmente em Board *et al.* (2001, tradução nossa), é apontado o crescimento dessa ameaça, principalmente pela venda não regulamentada de minas por países como Itália, Suécia e Rússia.

Mediante todo esse contexto, ressalta-se a eficiência das minas navais, apesar de ser um armamento relativamente barato, tendo elas o poder de abalar psicologicamente os responsáveis

---

<sup>6</sup> *United States Navy* – Marinha dos Estados Unidos, tradução nossa.

pelo tráfego marítimo, transformando uma área com probabilidade da existência de minas, em um CM. Assim, mesmo não sendo acionadas, são as causadoras de interromper a livre navegação (Freedberg Jr., 2015, tradução nossa).

Figura 2 - Militares da USN transportando esferas de minas do armazém para o galpão de montagem em 1919.



Fonte: Naval History and Heritage Command (2021).

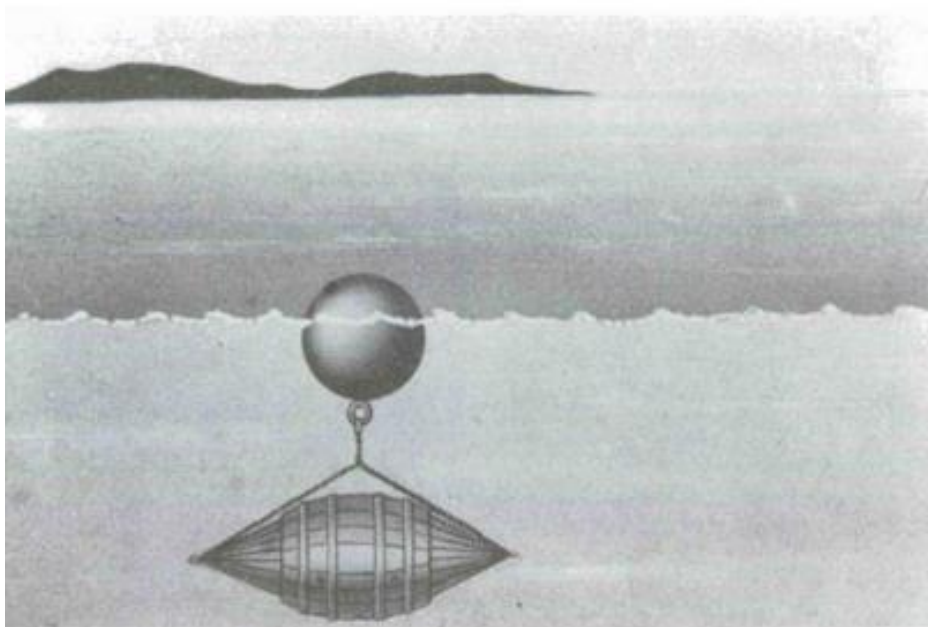
### 2.1.1 Desenvolvimento Histórico da Mina Naval

É pertinente notar que a China reivindica ser a pioneira na criação e fabricação de minas navais, declarando ter concebido esse artifício durante a dinastia Ming, por volta do século XVI. No entanto, o início da manufatura de minas chinesa é relatado por antigos pergaminhos datados de 1300. Essas minas eram caracterizadas por mecanismos rudimentares, simples e rústicos, incluindo o uso de penas de ganso ou pato selvagem, incensos e intestino de cabra. Apesar de inicialmente terem apenas manuscritos sobre esse armamento, foi a partir deles que se deu início à evolução desse artefato, que acabou sendo incorporado ao arsenal chinês durante a Segunda Guerra do Ópio (1856-1860) e foi notavelmente utilizado na batalha do Rio Han em 1856 (Needham e Ping-Yü, 1986, tradução nossa).

De acordo com Hartmann e Truver (1991, tradução nossa), em 1776, na Universidade de Yale, o estudante David Bushnell realizou experimentos com explosões subaquáticas. Ele constatou que, se um artefato explosivo atingisse o casco de uma embarcação pelos lados ou pelo fundo, causaria sérios danos e poderia afundá-la.

O uso deste inovador tipo de armamento, conhecido como *Bushnell's Keg*, recebeu autorização do General Washington em dezembro de 1777, com a finalidade de ser empregado contra os navios britânicos que estavam fundeados no rio Delaware, na Filadélfia. Apesar de ainda fazer uso de mecanismos relativamente simples, o dispositivo apresentava avanços comparáveis às minas chinesas. Ele consistia em um barril contendo uma carga de pólvora e ficava submerso a alguns metros de profundidade, sendo mantido à tona por um flutuador na superfície, como representado pela Figura 3. Internamente, possuía um canhão ajustado de modo que um leve impacto fosse capaz de liberar o martelo, disparando a pólvora. A operação teve início em janeiro de 1778; no entanto, devido a fatores climáticos, como o gelo e as correntes do rio, as minas não conseguiram atingir a frota britânica fundeada (Dissanayake e Costa, 2023, tradução nossa; Duncan, 1962, tradução nossa).

Figura 3 - *Bushnell's Keg*.



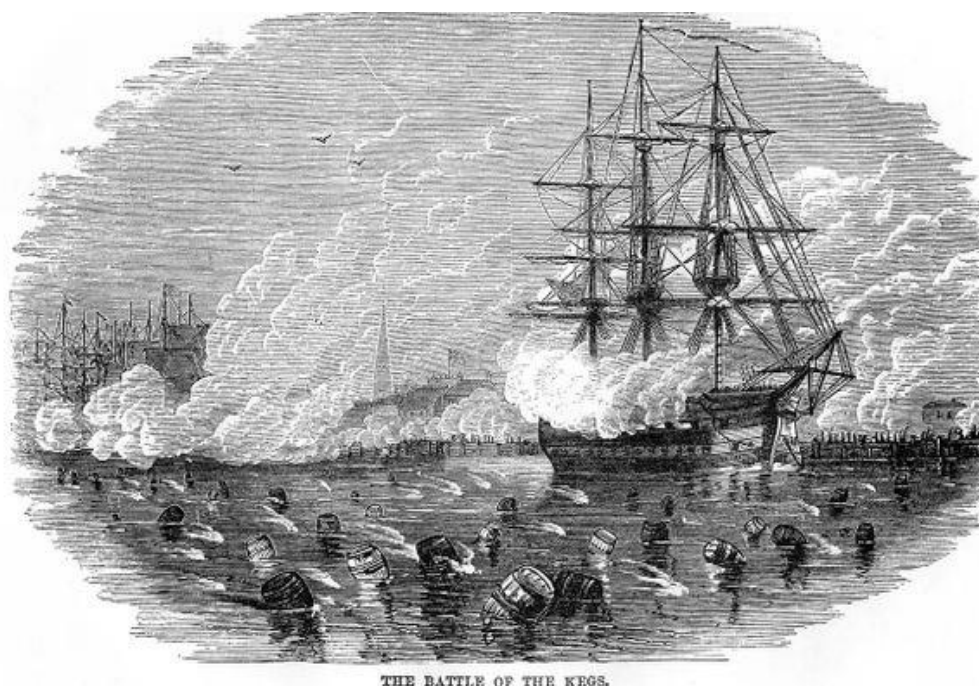
Fonte: Gears of History (2023).

Como era um protótipo, o invento de Bushnell era extremamente instável e chegou a explodir durante o manuseio. As únicas baixas registradas ocorreram quando uma pequena

embarcação da *Royal Navy*<sup>7</sup> (RN), enviada para investigar o que eram esses artefatos que desciam no rio, teve contato com o artefato, acabando por acioná-lo (Gears of History, 2023, tradução nossa). O trágico acidente resultou na morte dos militares que o manuseavam e alertou os navios britânicos, desencadeando a destruição dos "barris" em um evento conhecido como *The Battle of Kegs*<sup>8</sup>, ilustrada na Figura 4 (Duncan, 1962, tradução nossa). Devido a essa falha, pode-se inferir a remoção da circulação desses "barris" durante a Guerra de Independência dos EUA.

Apesar do insucesso operacional, as *Bushnell Kegs* podem ser consideradas a primeira operação de minagem da história (Hartmann e Truver, 1991, tradução nossa)

Figura 4 - *The Battle of Kegs*.



Fonte: Rogoway (2020).

Na Europa, o desenvolvimento das minas evoluiu logo após a Guerra Austro-Prussiana (1866), quando um mecanismo de acionamento chamado de *Hertz horn* foi desenvolvido, e isso possibilitou a criação das minas de contato. Esse dispositivo consistia essencialmente de um sistema composto por um eletrólito e um tubo de vidro, envolto por um chifre de metal macio, que ficava na parte externa da mina. Ao ser dobrado pelo atrito de um navio, rompia o tubo de

<sup>7</sup> *Royal Navy* – Marinha Real Britânica, tradução nossa.

<sup>8</sup> *The Battle of Kegs* – A Batalha dos Barris, tradução nossa.

vidro, completando o circuito e acionando o detonador elétrico, explodindo a mina (Duncan, 1962, tradução nossa).

Hartmann e Truver, (1991, tradução nossa) aponta que no final do século XIX houve o desenvolvimento de um sistema de regulação de profundidade para as minas de fundeio pela RN, permitindo a regulação automática de profundidade desde que não ultrapassasse o comprimento máximo do dispositivo, além do incremento de um sistema de bateria próprio para a mina.

Durante a Guerra Russo-Japonesa (1904-1905), houve o desenvolvimento das primeiras técnicas de CMM, quando os russos varreram os campos minados japoneses ao largo de *Port Arthur*, adotando uma abordagem inovadora ao empregar um rebocador a vapor, rebocando ganchos à ré. Essa tática foi complementada por uma equipe de rebocadores que, combinada ao rebocador principal, arrastavam uma amarra pesada entre eles, conforme relatado por Lott (1959, tradução nossa).

A tecnologia de minagem naval e as CMM avançaram de forma expressiva durante os dois grandes conflitos mundiais. Durante a Primeira Guerra Mundial, a Alemanha usou submarinos *U-boats* para minar portos norte-americanos, enquanto novas minas de lançamento automático com regulação de profundidade foram desenvolvidas. Os britânicos também avançaram com a técnica de Varredura Mecânica "Oropesa" (Lott, 1959, tradução nossa).

De acordo com Vogt (2019a), Hartmann e Truver (1991, tradução nossa) e Dissanayake e Costa (2023, tradução nossa), ocorreu um grande avanço tecnológico durante a Segunda Guerra Mundial, com ambas as partes investiram em minas mais sofisticadas acionadas por sinais magnéticos, acústicos ou de pressão, incluía-se minas de fundo de influência<sup>9</sup>. Isso demonstrou a evolução das minas que, antes, eram acionadas somente por contato. Essas minas eram mais perigosas, pois podiam causar danos a embarcações à distância e eram mais difíceis de serem identificadas. Além disso, taticamente, a guerra viu o uso de aeronaves para implantar CM em áreas controladas pelo inimigo.

No que diz respeito à evolução das minas navais no século atual, é de suma importância destacar que os avanços na microeletrônica possibilitaram a criação de sistemas "inteligentes". Estes sistemas têm a capacidade de capturar e identificar assinaturas eletrônicas, acústicas e de pressão previamente programadas. Um exemplo notável é a capacidade das minas de realizar

---

<sup>9</sup> Minas de fundo de influência - Mina submarina lançada no solo submarino onde permanece até ser detonada por comando remoto ou por choque do alvo, ou por influência acústica, magnética ou de ondas de pressão geradas pelo alvo em movimento e da mina de fundeio, esta mina pousa no fundo dificultando a identificação com sonar e são acionadas pelos sinais descritos (Brasil, 2015).

contagem de navios que passam, o que lhes permite aguardar até que a área a ser atingida pela detonação contenha um número suficiente de navios, visando otimizar a eficácia, ou até mesmo programar sua ativação após um determinado número de passagens de uma assinatura específica.

Com o emprego de algoritmos, fundamentais não apenas para abordar as situações mencionadas anteriormente, mas também para gerenciar uma variedade de cenários previsíveis, a modernização das minas depende de parâmetros críticos. Esse avanço culminou na concepção das minas móveis e inteligentes, que, essencialmente, consistem em UUVs. Eles são capazes de alterar sua posição por meio de comandos remotos ou pré-programados, conforme descrito por e mencionado por Vogt (2019a).

Além disso, as minas mais modernas estão equipadas com sensores eletrônicos e processadores de sinal, o que permite a implementação de programações para localizar alvos com assinaturas específicas, reduzindo significativamente o risco de serem neutralizadas por varreduras de minas de influência. Essas inovações representam avanços significativos na tecnologia de minagem naval. Atualmente, iniciou-se o uso da inteligência artificial empregada na operação de minagem (Dissanayake e Costa, 2023, tradução nossa).

### 2.1.2 Classificação das Minas Navais

Em primeiro plano observa-se distintas classificações de minas por diferentes especialistas da área de minagem. Nesse mesmo diapasão, esse tópico será baseado pela fusão de pensamentos de alguns destes especialistas, com ênfase principal na teoria do Capitão de Mar e Guerra Chris O'Flaherty (2019), da RN. Complementarmente, o objetivo do exposto a seguir é tratar de maneira concisa os tipos de minas, evitando aprofundar-se nos aspectos técnicos.

No contexto da teoria de Flaherty (2019, tradução nossa), as minas navais são categorizadas com base em três critérios fundamentais: sua posição na coluna d'água após o lançamento, o método de atuação e o método de lançamento. Essa classificação, amplamente reconhecida internacionalmente, é também adotada pela MB. A Figura 6 ilustra um compilado de todas as classificações das minas navais.



### 2.1.2.1 *Posição na coluna d'água*

Após serem lançadas, as minas navais podem assumir diferentes posições em relação a superfície do mar, sendo classificadas como minas de fundo, de fundeio ou derivantes, de acordo com a terminologia de Flaherty (2019, tradução nossa).

As minas de fundo, com flutuabilidade negativa, permanecem no leito marinho devido ao seu próprio peso após o lançamento. No entanto, sua eficácia pode ser prejudicada em áreas com correntes marítimas intensas ou leitos de areia ou lama, onde condições adversas podem afetar negativamente seu desempenho e seus sistemas de detecção (Hartmann e Truver, 1991, tradução nossa). Em contraste, as minas de fundeio, com flutuabilidade positiva, são equipadas com mecanismos de ancoragem que as fixam ao fundo do mar. Isso possibilita seu uso em águas mais profundas e evita que seu sistema de detecção seja afetado, além de algumas permitirem a compensação das variações da maré, garantindo uma posição constante em relação à superfície (Dissanayake e Costa, 2023, tradução nossa; Flaherty, 2019, tradução nossa).

Figura 5 – Mina derivante.



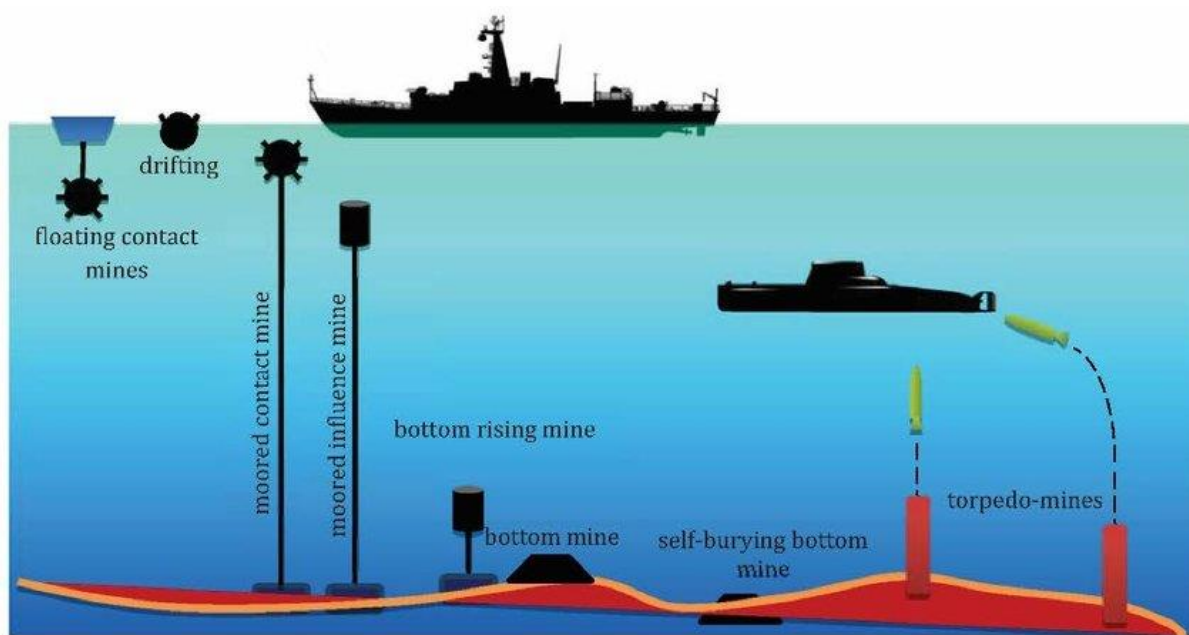
Fonte: Albon (2011).

Por outro lado, as minas derivantes (Figura 5), caracterizadas pela flutuabilidade positiva, não estão equipadas com mecanismos de ancoragem ao leito marinho, permitindo que

se movam em resposta às correntes marítimas e ao vento. Devido à sua visibilidade, essas minas têm um uso tático especializado e são geralmente empregadas por navios que buscam evadir perseguições. É importante observar que o uso das minas derivantes é regulamentado por restrições estabelecidas pela Legislação Internacional, de acordo com a ONU.

Em complemento à teoria de Flaherty (2019, tradução nossa), segundo Erickson, Murray e Goldstein (2009, tradução nossa), as minas oscilantes são projetadas para variar sua flutuabilidade entre negativa e positiva, alterando sua profundidade de acordo com o definido no projeto. Outro tipo de minas são as autopropulsadas, que são lançadas por submarinos, semelhantes a torpedos, a uma longa distância dos CMs planejados. Quando atingem a posição desejada, passam a atuar como minas de fundo. A Figura 6 abaixo amplia a visão das classificações das minas navais expostas neste trabalho.

Figura 6 – Classificação das minas navais.



Fonte: Szturomski (2015).

É notável que conflitos contemporâneos entre Estados, ocorrem cada vez menos conforme a norma que os rege, a Carta das Nações Unidas<sup>10</sup> de 1945, que estipula a declaração formal de um conflito no seu Artigo 2º, parágrafo 4º, declarando que o uso da força entre as nações é vetado pelo Direito Internacional, no entanto esse princípio é contrariado pelo disposto no Artigo 51, o qual permite a autodefesa individual ou coletiva, na iminência de uma ameaça.

<sup>10</sup> Carta das Nações Unidas – Tratado que estabeleceu as Nações Unidas (Nações Unidas, 2007).

Portanto, pode-se inferir que o emprego de CMs defensivos em tempos de paz, assim como o uso de minas derivantes que possuam esterilização após uma hora da perda de seu controle, seja feito em acordo com as disposições estabelecidas na carta (Naciones Unidas, 1945, tradução nossa).

### 2.1.2.2 *Método de atuação*

A despeito dos métodos de atuação, eles desempenham um papel fundamental não só no planejamento e no desenvolvimento das operações de CMM, mas também permitem aos demais navios se precaverem quanto à ativação dos mecanismos de detonação. A classificação das minas navais quanto à atuação se subdivide em minas de contato, influência e remotamente controladas (Flaherty, 2019, tradução nossa).

Segundo Flaherty (2019, tradução nossa), as minas de contato são dispositivos compostos por frágeis hastes, também chamadas de "antenas". Essas hastes são ativadas ao entrarem em contato com o casco dos navios ou pela força da água gerada pelo deslocamento dos navios, o que dispara o circuito de detonação. Essas minas são conhecidas por sua simplicidade e baixo custo de produção, e têm um histórico longo de uso na guerra naval. No entanto, têm limitações na identificação de alvos, se restringindo, em grande parte, ao calado dos navios quando usadas como minas de fundeio.

As minas de influência, classificadas como magnética e/ou acústica e/ou pressão, representaram avanços tecnológicos significativos na eficiência dos CMs e na discriminação de alvos. Ao contrário das minas de contato, esses dispositivos podem ser acionados por meio da detecção de assinaturas magnéticas, acústicas e anomalias de pressão na coluna d'água geradas pelos navios-alvo, eliminando a necessidade de contato físico com a mina (Flaherty, 2019, tradução nossa). Além disso, o aprimoramento da sensibilidade e tecnologia desses sistemas permitiu a distinção entre tipos de navios, o que tornam as ações de desminagem em áreas com minas de influência mais desafiadoras, mesmo com a simulação de assinaturas, especialmente quando combinadas com minas de contato (Dissanayake e Costa, 2023, tradução nossa). A Figura 7 ilustra a explosão de uma mina de influência.

Figura 7 – Mina explodindo a partir de uma varredura de influência.



Fonte: Open Oceans ([202?]).

Concluindo a classificação das minas quanto à atuação, de acordo com Flaherty (2019, tradução nossa), as minas remotamente controladas consistem em explosivos posicionados estrategicamente em pontos-chave e acionados à distância, permitindo a capacidade de ativar ou desativar CMs. Devido à necessidade de uma infraestrutura fixa em terra, essas minas são frequentemente empregadas em CMs defensivos, especialmente quando integradas a sistemas de defesa marítima em camadas.

### 2.1.2.3 *Método de lançamento*

A flexibilidade das minas navais possibilita o seu lançamento por meio de três métodos distintos: aéreo, de superfície e submarino, cada um apresentando compromissos específicos entre precisão, capacidade de reminearem, velocidade e discrição (Flaherty, 2019, tradução nossa).

Devido à sua capacidade de alcance, rapidez e mobilidade no que tange ao lançamento de minas, o método aéreo tornou-se a plataforma prioritária quando se trata da implantação de campos minados ofensivos, que não necessitam de alto grau de precisão. Sendo uma escolha eficaz para manter a ameaça no perímetro do campo minado através da remineagem, podendo

ser realizada de forma muito segura (Dissanayake e Costa, 2023, tradução nossa; Flaherty, 2019, tradução nossa).

Por outro lado, o lançamento de minas por meio de superfície oferece precisão satisfatória a uma velocidade razoável, permitindo o transporte de um maior número de minas em comparação com as abordagens aéreas e submarinas (Dissanayake e Costa, 2023, tradução nossa). Em Freedberg Jr. (2015, tradução nossa), ressalta-se que em certos eventos da história foi alcançada a discriminação da minagem através do uso de navios civis, como no caso dos rebocadores empregados durante a Guerra do Golfo, no final do século XX; no entanto, seu uso em CMs ofensivos é frequentemente desaconselhado.

Enfim, o método de lançamento de minas por submarinos é preferível quando é de suma importância um elevado grau de sigilo no lançamento de um CM. No entanto, este método apresenta desafios em termos de precisão e velocidade de execução, bem como um risco significativo à segurança do submarino ao realizar a reminagem. Além disso, o transporte de minas implica na redução do número de torpedos a bordo, o que requer uma avaliação cuidadosa de sua viabilidade e utilidade (Flaherty, 2019, tradução nossa).

### 2.1.3 As Operações de Minagem e CMM

Conforme a Doutrina Militar Naval (DMN), as operações de minagem são consideradas uma opção clássica para cumprir a tarefa básica do Poder Naval (PN), que consiste em negar ao inimigo o uso do mar. A DMN fornece a seguinte definição:

A operação de minagem consiste no lançamento criterioso de minas em áreas selecionadas, a fim de destruir navios ou meios terrestres inimigos, ou ainda, pela ameaça que representa, para conter, limitar ou retardar o seu trânsito. É tradicionalmente associada ao conceito de desgaste, ou seja, ao enfraquecimento das forças inimigas. Pode ser útil em um conflito de curta duração, porque o simples retardamento do trânsito, sobretudo de unidades navais ou forças terrestres inimigas, pode constituir um efeito desejado (Brasil, 2017, p. 3-7).

As operações de minagem destacam-se por sua maior facilidade, celeridade e eficiência econômica em comparação com as operações de CMM, estas últimas notoriamente demandando aproximadamente dez vezes mais tempo do que a minagem em si (Vogt, 2020).

Conforme Brasil (2017), as CMM ou *Mine Countermeasures* (MCM) referem-se a um conjunto de ações que engloba medidas tanto ativas quanto passivas. Essas medidas têm o propósito de reduzir e, em certos casos, prevenir os danos provocados por minas inimigas, abrangendo uma ampla gama de tarefas, que vão desde o ataque aos agentes lançadores até a

remoção dos artefatos lançados, incluindo também a adoção de procedimentos para evitar áreas sabidamente minadas.

Essas operações visam principalmente garantir a liberdade de navegação em áreas marítimas restritas, bem como nas entradas e saídas de portos, pontos focais frequentemente selecionados para a criação de CMs.

Dessa forma, conforme a DMN, a CMM busca garantir a segurança das OPN em áreas potencialmente perigosas.

A utilização das operações de minagem demonstrou ser decisiva em diversas batalhas ao longo da história, mantendo-se como um armamento eficiente mesmo diante do contínuo desenvolvimento tecnológico.

Diante desse contexto, as CMM precisam manter-se um passo à frente das tecnologias de minagem. Uma questão emergente para as CMM é relacionada às plataformas a serem empregadas, questionando se devem ser baseadas em plataformas dedicadas ou se devem integrar um pacote modularizado, permitindo que navios de propósito geral sejam utilizados quando necessário (Erickson; Murray; Goldstein, 2009, tradução nossa; Smith, 2005, tradução nossa).

### *2.1.3.1 Divisão das operações de CMM*

O objetivo primordial das operações de CMM é enfrentar a ameaça representada por minas marítimas. A principal divisão das CMM ocorre entre ativas e passivas, sendo essa classificação amplamente reconhecida em nível mundial, também estabelecida pela MB (Flaherty, 2019, tradução nossa).

Flaherty (2019, tradução nossa), estabelece que as CMM passivas englobam ações realizadas por todas as embarcações para reduzir ou até mesmo neutralizar a ameaça de um CM, sem a necessidade de agir diretamente contra a mina. Um exemplo dessas ações é a utilização de equipamentos projetados para diminuir as assinaturas magnéticas e acústicas, bem como a adoção de estratégias para desviar da rota prevista.

No que concerne às CMM ativas, estas são subdivididas em ofensivas e defensivas. As CMM ativas ofensivas são caracterizadas por ações direcionadas a impedir o lançamento de minas, envolvendo a neutralização ou destruição das plataformas de lançamento, além da eliminação de fábricas, unidades de produção ou depósitos de armazenamento de minas. Seu principal objetivo é evitar o êxito na implantação de novas minas (Flaherty, 2019, tradução nossa).

Por outro lado, as operações ativas defensivas de CMM são conduzidas contra minas já lançadas, o que envolve a varredura, a caça de minas ou a utilização de mergulhadores especializados em Desativação de Artefatos Explosivos (DAE) (Flaherty, 2019, tradução nossa).

### 2.1.3.2 *A evolução da doutrina e dos meios utilizados*

Conforme descrito por Flaherty (2019, tradução nossa), as operações de CMM tiveram início no final do século XIX, quando a principal ameaça eram as minas de contato. Essas operações eram realizadas de duas maneiras distintas. A primeira consistia em empregar dois navios navegando lado a lado e conectados por um cabo de aço, com o objetivo de arrastar o fundo e deslocar as minas para uma área segura. O segundo método envolvia o uso de um dispositivo de metal chamado paravane<sup>11</sup>, conforme a Figura 8, fixado na proa do navio, assemelhando-se a um torpedo equipado com hidrofólios<sup>12</sup>. Esse dispositivo tinha a capacidade de puxar o cabo de aço ligado ao mecanismo de fundeio das minas quando o navio atingia uma velocidade suficiente para esticar o dispositivo.

Figura 8 – Paravane.



Fonte: Hubert (2021).

<sup>11</sup> Paravane - “Planador” subaquático desenvolvido entre os anos de (1914-1916). Inicialmente desenvolvido para destruir minas navais, sendo lançado ao lado do navio de reboque, a partir da proa (Hubert, 2021).

<sup>12</sup> Hidrofólio-É uma estrutura semelhante a uma asa submersa, que atua como superfície de sustentação dentro da água. Sua aparência e finalidade são comparáveis aos aerofólios utilizados em aeronaves.

Após o início da CMM, os britânicos aprimoraram o material utilizado na confecção do dispositivo empregado nas varreduras de minas. Incorporaram outras placas metálicas que, quando expostas à ação da velocidade da água durante a passagem, mantinham o dispositivo a uma profundidade constante. Além disso, foram adicionadas tesouras<sup>13</sup> para realizar o corte do cabo de aço das minas de fundeio. Esses avanços proporcionaram uma significativa redução de tempo nas varreduras, além de aumentar a confiabilidade da operação (Melia, 1991, tradução nossa).

Nesse contexto, de acordo com Flaherty (2019, tradução nossa), foram introduzidas mudanças na doutrina de varredura, que teve que lidar com a presença de minas de influência magnética e acústica. Diante dessa situação, novas técnicas e equipamentos foram incorporados, permitindo a simulação das assinaturas magnéticas e dos ruídos emitidos por navios maiores. Entre esses avanços, destacam-se as caudas magnéticas e os martelos acústicos.

Uma evolução à varredura, foi o conceito de “caça-minas”, Flaherty (2019, tradução nossa) define a caça de minas como uma doutrina que utiliza sensores, como sonares, lasers, câmeras de vídeo e magnetômetros<sup>14</sup>, para identificar objetos com características de minas navais. Isso permite o emprego de mergulhadores ou veículos controlados remotamente na neutralização da ameaça após localizada pelos recursos citados acima. Embora a doutrina da caça de minas tenha introduzido novas tecnologias, a doutrina de varredura não foi completamente substituída.

A caça de minas, devido à sua variedade de sensores, apresenta-se como uma opção mais segura e eficaz, especialmente contra minas de influência modernas com capacidade de contagem de navios. No entanto, mesmo com avanços tanto na caça quanto na varredura de minas, ainda persistem desafios a serem solucionados nas CMM em águas rasas ou próximas a praias, as quais são empreendidas por mergulhadores especializados em DAE (Dissanayake e Costa, 2023, tradução nossa).

### 2.1.3.3 *Do NV ao Navio de CMM*

Na seção anterior, foi apresentada uma visão superficial sobre os NVs e os caça-minas (NCM). Nesta seção, será realizada uma abordagem mais aprofundada desses meios navais de

---

<sup>13</sup> Tesouras-Pertencentes ao grupo de equipamentos de varredura mecânica, compostos por um par de lâminas, com a finalidade de realizar o corte do cabo de aço de uma mina de fundeio.

<sup>14</sup> Magnetômetros-Instrumento empregado para aferir a intensidade dos campos magnéticos.



CMM, além de introduzir uma perspectiva moderna para esse fim, os Navios de Contramedidas de Minagem (NCMM).

Seguindo os conceitos apresentados no Glossário das Forças Armadas (2015), as tecnologias disruptivas levaram a uma significativa evolução das CMM, que teve início com a criação dos NVs, seguida pelos navios NCM e, posteriormente, pelos NCMM. De acordo com a conceituada obra de Fonseca (2002), Arte Naval, livro fundamental da MB, temos a seguinte definição dos dois primeiros tipos de navios:

Os navios caça-minas modernos são dotados de equipamentos sofisticados e especiais para efetuar o rastreamento de minas, como um sonar, um veículo remotamente dirigido e uma equipe de mergulhadores para neutralizar as minas. A principal diferença está na sofisticação técnica. O varredor pode efetuar varreduras dos tipos acústica, magnética, mecânica ou combinada (acústica e magnética ou magnética e mecânica), dependendo do tipo de mina a ser varrida, visando a provocar por excitação a destruição da mina. Já o caça-minas atua com a finalidade de detectar, investigar e neutralizar a mina, demandando mais tempo, porém com maior eficiência para limpar áreas minadas ou na abertura de um canal varrido permitindo o trânsito de navios amigos (Fonseca, 2002, p. 116).

De acordo com o Guia Completo de Guerra de Minas do Século XXI United States<sup>15</sup>(2014), a caça de minas tem o poder de assessorar o comando com informações precisas, proporcionando um grau elevado de certeza de que uma área de interesse está livre de minas marítimas ou, ainda, de que há uma chance ínfima de um navio ser atingido. Para essa finalidade, os NCM seguem as seguintes etapas: detecção, classificação, identificação, localização e plotagem, e, posteriormente, a neutralização ou destruição da mina.

Os NCM utilizam sonares para detecção e classificação de alvos, enviando posteriormente mergulhadores especializados em DAE ou veículos não tripulados para inspeção e neutralização da ameaça. Esses navios são projetados de modo a minimizar suas assinaturas magnéticas e acústicas, que são dois dos principais gatilhos para o acionamento de minas.

Sua estrutura é modificada visando à furtividade em relação às minas marítimas, como, por exemplo, a insonorização pela montagem de máquinas em amortecedores e equipamentos, ou a realização de um acionamento elétrico silencioso com o uso de motores elétricos magnéticos de baixo ruído (White, 2021, tradução nossa).

Em relação aos cascos, os NCM e os NVs são normalmente projetados em madeira, fibra de vidro ou metal não ferroso, sendo desmagnetizados para reduzir a assinatura magnética

---

<sup>15</sup> Guia Completo de Guerra de Minas do Século XXI – Tradução nossa para o livro: *21st Century Complete Guide to Naval Mine Warfare*.

(White, 2021, tradução nossa). Conforme Vogt (2019b), de maneira geral, os novos meios de superfície de CMM são monocasco, geralmente fabricados em Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (GRP<sup>16</sup>) ou madeira.

A segunda geração desses navios teve seus cascos construídos com a composição de fibra de vidro, com uma camada intermediária de espuma, formando um "sanduíche" de duas camadas, tornando-os mais leves, capazes de resistir a maiores impactos e corrosão, além de facilitar qualquer tipo de reparo (Moralez, 2019). Toda essa evolução estrutural foi em busca da redução da assinatura magnética, acústica, elétrica, infravermelha e de pressão, conferindo a esses meios navais do PN uma maior furtividade ao entrarem no TON. Os NCM (Figura 9), comumente são embarcações pequenas de baixo calado, pois operam geralmente em águas restritas, como canais e portos. Devido à dificuldade de manobrar nessas áreas, o propulsor utilizado nesses navios geralmente é do tipo azimutal<sup>17</sup> ou cicloidal<sup>18</sup>, permitindo que o impulso do motor seja distribuído em qualquer direção. Adicionalmente, têm-se utilizado cascos de catamarã, proporcionando uma plataforma de trabalho extensa e estável com o mínimo de contato com a superfície. Dessa forma, reduz-se o calado e, ao mesmo tempo, a transmissão acústica, bem como diminui a pressão do fluido criado pelo movimento do navio, o que, de outra maneira, poderia detonar as minas devido à pressão hidráulica (White, 2021, tradução nossa).

---

<sup>16</sup> GRP - *Glass Reinforced Plastic* - Plástico Reforçado com Vidro, tradução nossa.

<sup>17</sup> Propulsor azimutal - O princípio é a substituição do hélice com eixo fixo por um propulsor que pode mudar o sentido de sua corrente de descarga dirigindo sua força para qualquer ponto do azimute da embarcação. A principal característica desses rebocadores está no fato de não precisarem de leme para governo, pois o propulsor, com atuação de 360 graus, já faz esse papel. Suas principais qualidades, quando comparados com os de propulsão convencional, são a forma segura com que podem controlar a aproximação com a proa ou popa do navio em velocidade, e a possibilidade de atuar para vante ou para ré, mantendo praticamente a força de tração (Duna, 2014).

<sup>18</sup> Propulsor Cicloidal - O sistema de propulsão cicloidal é composto por um conjunto de lâminas verticais móveis instalados em um disco rotativo paralelo ao fundo do rebocador. O disco gira em velocidade baixa e constante, produzindo uma força de intensidade e sentido controlados através do ângulo (passo) de cada uma das lâminas. O conceito é semelhante ao do hélice de passo controlado (variável), porém, com a diferença de que o posicionamento das pás é transversal à força exercida. A principal vantagem desse sistema de propulsão, além da óbvia importância de poder atuar para todas as direções radiais com a mesma força de tração, é a velocidade com que as alterações do sentido da aplicação e da intensidade da força podem ser aplicadas, ou seja, alta manobrabilidade (Duna, 2014).

Figura 9- NCM Classe "Lerici", da Marinha italiana.



Fonte: White (2021).

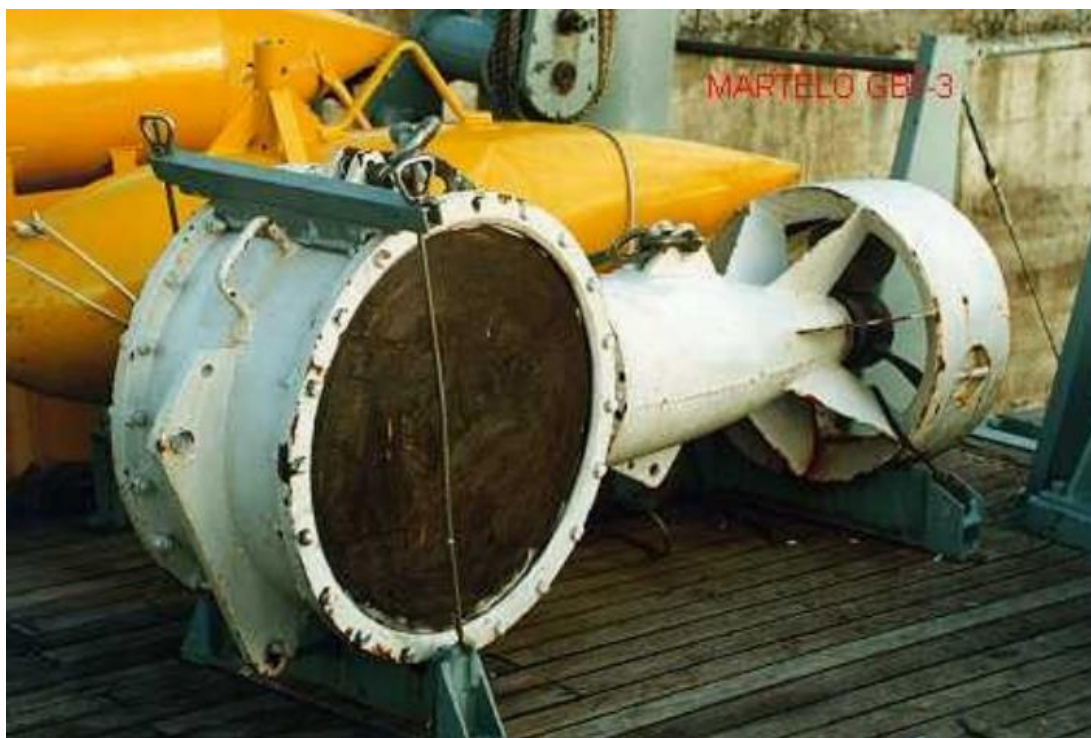
Quanto à segunda categoria de CMM, a varredura de minas, ela é composta pelos sistemas mecânico e de influência. O primeiro sistema é mais arcaico, envolvendo o corte das amarras de minas navais fundeadas ou, ainda, causar danos físicos à mina ou ao seu mecanismo de controle, por meio de correntes arrastadas na coluna d'água.

Ao cortar esses dispositivos de fundeio, a operação evolui para a fase de neutralização ou recolhimento das minas, sendo esta última uma medida adotada para obter informações de inteligência sobre o inimigo.

Já o sistema de varredura de influência tem sua base na manipulação de assinaturas magnéticas, elétricas, acústicas, sísmicas ou de pressão do navio, com o intuito de provocar a detonação do artefato (Brasil, 2015; DoD, 2014, tradução nossa). Comparada à caça de minas, a varredura de minas é considerada mais perigosa para as embarcações envolvidas, devido aos procedimentos executados em campo, além da necessidade da embarcação adentrar no CM durante a execução da operação.

Ademais, após a conclusão de uma operação de varredura, permanece um risco residual à livre navegação na área, devido à possível remanescência de alguma mina não neutralizada (DoD, 2014, tradução nossa; Vogt, 2019a). Brasil (2015) e White (2021, tradução nossa) apresentam as características dos NVs, os quais são concebidos com dimensões modestas e projetados para a remoção ou detonação de minas, com o objetivo de manter as vias navegáveis em áreas marítimas de uso previsto. Esses navios são equipados com dispositivos mecânicos ou elétricos, conhecidos como “*sweeps*<sup>19</sup>”, destinados a desativar as minas. Os dispositivos de varredura mecânica são projetados para cortar o cabo de amarração de cada mina de fundeio e removê-las da área à medida que emergem à superfície, ou induzir a explosão dessas minas por meio do contato mecânico do aparelho de varredura ou de sua tripulação.

Figura 10- Martelo acústico GBT-3 da MB.



Fonte: Brasil (2022b).

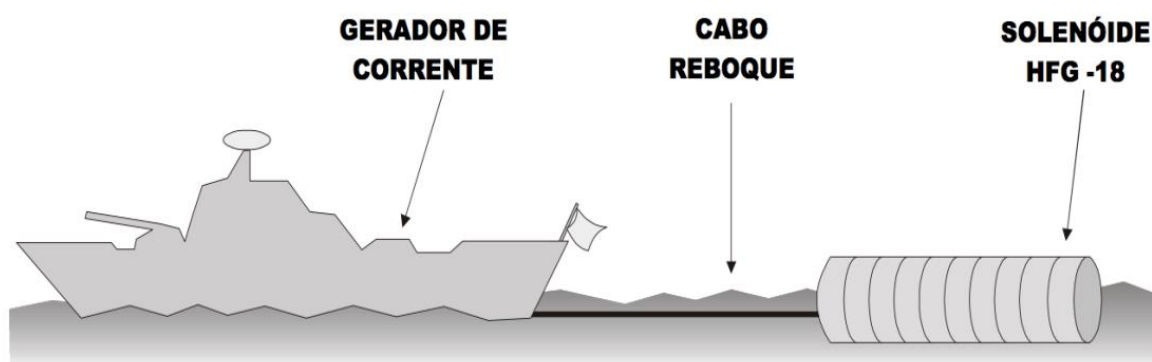
No que tange à varredura de influência, os NVs utilizam equipamentos rebocados que simulam uma assinatura de navio. A varredura acústica é realizada por meio de martelos eletroacústicos e mecânicos (Figura 10), sendo que o primeiro, opera em frequências médias e baixas, enquanto o segundo, por meio do fluxo de água nas pás do martelo, gera um ruído de alta frequência.

---

<sup>19</sup> *Sweeps* – “Varreduras”, tradução nossa.

A varredura de influência magnética é executada por meio do reboque de uma cauda magnética<sup>20</sup> ou HFG-18<sup>21</sup>, produzindo um campo magnético para ativar minas de influência magnética. Nesse contexto, as varreduras de influência também podem ser compostas, baseando-se na operação simultânea das duas varreduras (Brasil, 2015). Na Figura 11 abaixo é esquematizado uma operação de varredura de influência magnética com HGF-18.

Figura 11 - Esquema de Varredura de Influência Magnética com HFG-18.



Fonte: Brasil (2022b).

Em White (2021, tradução nossa), fica evidente a importância tanto dos NCM quanto dos NVs. Os NCM são geralmente empregados na detecção e neutralização de minas individuais, enquanto os NV são mais adequados para a limpeza de áreas abertas com uma quantidade elevada de minas, demonstrando a complementaridade desses meios. Ambos os tipos de navios são coletivamente referidos como NCMM, um termo que também abrange navios que desempenham ambos os papéis.

Com os avanços tecnológicos demandando maior precisão e celeridade nas operações de caça de minas e varredura, tornou-se necessário integrar essas duas atividades em uma única embarcação, surgindo assim o conceito de NCMM. Essa abordagem visa não apenas aumentar a eficiência, mas também proporcionar uma execução mais fluida dos procedimentos, bem como garantir maior segurança para o pessoal e o equipamento envolvidos (Dagnino, 2020).

Vogt (2019a) discute em seu artigo a aquisição dos NCMM pelas Marinhas, resumindo os principais requisitos que justificam esse investimento: aprimoramento da proteção contra detonações de minas para a tripulação e os sistemas embarcados; alto desempenho dos sistemas de CMM, principalmente em termos de disponibilidade, eficiência, confiabilidade e precisão durante o levantamento de uma área suspeita ou minada; evolução na capacidade de

<sup>20</sup> Cauda Magnética – Eletrodo que gera um campo magnético.

<sup>21</sup> HGF-18 – Equipamento usado em NV que opera com bobinas eletromagnéticas.

deslocamento, buscando maior velocidade, raio de ação e autonomia; e, por fim, a redução dos custos de aquisição, operação e manutenção (Brasil, 2019).

#### 2.1.3.4 *O emprego de veículos não tripulados*

Diante da notável modernização das minas marítimas, que elevou sua letalidade e furtividade, resultando numa evolução de sua capacidade contra as CMM, somada aos crescentes custos dos projetos, dos meios navais e da formação dos militares, e considerando também uma mudança na abordagem em relação ao risco nas operações de CMM, ingressou-se em um novo estágio para a GM (Winnefeld JR, 2018, tradução nossa).

A ocultação das minas e a desafiadora tarefa de detecção tiveram um impacto significativo na formulação da doutrina naval, com um enfoque nítido na priorização da segurança do pessoal e do material, mantendo-os afastados ao máximo do perigo. Dessa concepção emergiu a primeira doutrina moderna “*Hunt where you can, sweep where you must*<sup>22</sup>”. Posteriormente, com o intuito de assegurar a segurança da tripulação e evitar riscos desnecessários, manifestou-se a segunda doutrina moderna “*Unmanned where you can, manned where you must*<sup>23</sup>” (Vogt, 2019a).

Os veículos não tripulados representam o novo estágio da GM, buscando soluções avançadas para lidar com o progresso tecnológico das minas. Esses veículos, diante dessa evolução, procuram uma abordagem mais eficiente, segura e econômica para detecção, varredura e caça de minas, tornando-se a solução ideal para enfrentar essas ameaças, enquanto ampliam o alcance para coleta de informações, vigilância e reconhecimento.

#### 2.1.4 A MB no Âmbito da GM

O Brasil é uma nação de significativa importância geopolítica, figurando entre as maiores economias do mundo e detentor de vastas riquezas naturais. O país possui o direito de exploração de uma extensa área marítima, aproximadamente 5,7 milhões de km<sup>2</sup>, que corresponde a mais da metade de seu território terrestre, sendo denominada como “Amazônia Azul<sup>24</sup>” (AA).

---

<sup>22</sup> *Hunt where you can, sweep where you must* – “Cace onde puder, varra onde for preciso” (Vogt, 2019a).

<sup>23</sup> *Unmanned where you can, manned where you must* – “Não tripulado sempre que possível, tripulado quando for necessário ou inevitável” (Vogt, 2019a).

<sup>24</sup> Amazônia Azul® - é a região que compreende a superfície do mar, águas sobrejacentes ao leito do mar, solo e subsolo marinhos contidos na extensão atlântica que se projeta a partir do litoral até o limite exterior da Plataforma Continental brasileira.

A dependência do Brasil em relação ao mar é evidente, com 80% de sua população residindo no litoral, onde também ocorrem 95% das atividades de comércio exterior. No setor energético, 85% da extração de petróleo e 75% da de gás natural estão associados ao ambiente marinho. Além disso, 45% da produção pesqueira tem essa mesma vinculação (Brasil, 2020b; Gonçalves, 2021; Morales, 2019).

A relevância das riquezas presentes nos mares e águas interiores do Brasil é destacada pelo Plano Estratégico da Marinha 2040:

O mar e as vias navegáveis interiores são vitais para o Brasil. Nas Águas Jurisdicionais Brasileiras<sup>25</sup> (AJB), o País possui direitos patrimoniais e de soberania que incluem o aproveitamento econômico de recursos até 200 milhas náuticas e, mais além, da extensão do solo e subsolo das áreas submarinas do País, definido pelos limites da Plataforma Continental. Estamos apontando uma área que, acrescida da Elevação do Rio Grande<sup>26</sup>, abrange cerca de 5,7 milhões de km<sup>2</sup> e cerca de 60.000 quilômetros de hidrovias (Brasil, 2020b, p.12).

Esses dados ressaltam a importância estratégica da AA para a soberania do Estado brasileiro, incumbindo à MB a responsabilidade por sua vigilância, monitoramento e proteção.

Dessa forma, é imperativo defender as águas litorâneas mesmo em tempos de paz, a fim de preservar o patrimônio nacional de possíveis ameaças. Nesse contexto, destaca-se o papel crucial desempenhado pela GM no cumprimento dessa missão.

Conforme Bonalume Neto (1994), é possível identificar o primeiro contato da MB com a GM durante o conflito da Guerra do Paraguai, no final do século XIX. Nesse cenário, os "engenhos," como eram chamadas as minas navais, representaram o principal obstáculo enfrentado pela MB ao subir o rio Paraguai. Nesse contexto, evidencia-se a vulnerabilidade das embarcações brasileiras a esse novo armamento, confirmada pelo afundamento do encouraçado "Rio de Janeiro" durante a tomada de Curuzu, em 1866, resultando na perda de 53 vidas. Após essa trágica ocorrência, o encouraçado "Tamandaré" foi adaptado com uma espécie de "protocaça-minas", e uma varredura do rio foi realizada por uma equipe em um bote, destacando, desde os primórdios, a necessidade das CMM. Esse evento pode ser considerado a primeira operação de CMM efetuada pela MB.

---

<sup>25</sup> Águas Jurisdicionais Brasileiras - compreendem as águas interiores e os espaços marítimos, nos quais o Brasil exerce jurisdição, em algum grau, sobre atividades, pessoas, instalações, embarcações e recursos naturais vivos e não-vivos, encontrados na massa líquida, no leito ou no subsolo marinho, para os fins de controle e fiscalização, dentro dos limites da legislação internacional e nacional. Esses espaços marítimos compreendem a faixa de 200 milhas marítimas contadas a partir das linhas de base, acrescida das águas sobrejacentes à extensão da Plataforma Continental além das 200 milhas marítimas, onde ela ocorrer.

<sup>26</sup> Elevação do Rio Grande – Proeminente feição morfológica do Atlântico Sul, localizada a cerca de 1.200 Km de Rio Grande-RS, possuindo elevado potencial econômico, mineral e energético, o que lhe confere relevância estratégica para geopolítica brasileira (Brasil, 2020b).

Posteriormente, em 1938, foi lançado ao mar o primeiro Navio Mineiro da Classe “Carioca”, construído no Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro (AMRJ), sendo posteriormente convertido em Corvetas.

A partir do Acordo de Assistência Militar entre Brasil e EUA, assinado em 1952, sucedeu-se o recebimento de vários navios norte-americanos usados (Brasil, 2020a, 2021). No meio desses navios, encontravam-se os quatro NVs da Classe “Javari”, sendo eles a motivação para o início da Força de Minagem e Varredura (ForMinVar), criada pelo Aviso Ministerial nº 0818, de 12 de maio de 1961, e à época subordinada ao Comando do 1º Distrito Naval (Com1DN) (Brasil, 2020a, 2021).

Em 1963, a ForMinVar teve sua subordinação transferida para o Comando em Chefe da Esquadra (ComemCh), e doze anos depois, foi transferida para a Base Naval de Aratu (BNA), em Salvador, BA, subordinada ao Comando do 2º Distrito Naval (Com2DN). Desde 1977, a ForMinVar passou a ser denominada Comando da Força de Minagem e Varredura (ComForMinVar) (Alves e Lami, 2019). Figura 12 ilustra todos as três distintas classes de NCMM que a MB já possuiu.

Segundo Macedo *et al.* (2010), com a incorporação dos NVs da Classe “Aratu”, sendo o primeiro dos seis navios em 5 de maio de 1971, a ForMinVar aprimorou sua capacidade operativa. Esses navios foram construídos na Alemanha, no estaleiro *Abeking & Rasmussen*, sendo seu projeto fundamentado na Classe “*Schültze*”, que naquela época estava entrando em serviço na Marinha Alemã.

Figura 12 – Na esquerda, o Navio Mineiro Classe “Carioca”; no centro, o NV Classe “Javari”; e na direita, o NV Classe “Aratu”.



Fonte: Brasil (2020a, 2021).

Com o passar dos anos, os NVs da Classe “Aratu” se aproximaram do término de suas vidas úteis. Nessa conjuntura, em 2001, a MB iniciou o programa de revitalização dos NVs, abrangendo reformas estruturais no madeirame, além da instalação de novos armários de regulação magnética desenvolvidos pelo IPqM (Alves e Lami, 2019).



Nas palavras de Padilha (2021) sobre as melhorias a partir da revitalização dos NVs:

O resultado dos testes e provas de mar nos navios varredores após o processo de revitalização apresentou resultados acima dos esperados. Adquiridos na década de 70, os seis navios varredores necessitavam dessa reforma para que permanecessem em serviço, sem que sua capacidade operativa fosse comprometida pelo estado físico do material, ou defasagem tecnológica (Padilha, 2021).

O último incremento estrutural das Organizações Militares (OM) vinculadas às CMM no Com2DN ocorreu em 2006, com a criação do Grupo de Avaliação e Adestramento de Guerra de Minas (GAAGueM), integrado ao Estado-Maior desse Comando. Sua missão consiste em produzir informações operacionais de GM, visando contribuir para o desenvolvimento, disseminação e atualização de doutrina, procedimentos operativos e emprego dos instrumentos de GM (Alves e Lami, 2019).

Atualmente, o ComForMinVar é composto por metade dos NVs que foram inicialmente adquiridos na década de 70, estando em serviço ativo os NVs: “Aratu”, “Atalaia” e “Araçatuba”, destacando a premente necessidade de modernização dos recursos desse Comando.

Quanto à aquisição de novos NCMM pela MB para substituição dos NVs da Classe “Aratu”, em 2009 foi criado o Grupo de Trabalho de GM, com o intuito de aprimorar as atividades relacionadas à GM, incluindo a revitalização dos NVs Classe “Aratu”, a aquisição de mais quatro NVs e oito NCMM (Macedo *et al.*, 2010).

A empresa sueca *Saab* está atenta às necessidades da MB, diante da degradação de seus meios de CMM, oriundos da década de 70, e ciente das demandas apresentadas pelo GTGM, mencionado anteriormente. Nesse contexto, a empresa vem propondo, desde o 1º Congresso Internacional de CMM, realizado na Escola de Guerra Naval (EGN) no Rio de Janeiro em 2017, a venda de meios e tecnologias de CMM à MB (Martini, 2017; Moralez, 2019).

Conforme Padilha (2023), alinhada ao pedido de informação (RFI<sup>27</sup>) lançado pela MB, a *Saab* apresentou a proposta para dois NCMM da Classe “*Koster*” (Figura 13). Essas embarcações seriam equipadas com tecnologia de última geração, incluindo a integração de sistemas não tripulados.

---

<sup>27</sup> RFI – *Request For Information*, Pedido de Informação, tradução nossa. Documento usado pelas empresas para solicitar informações a respeito de um produto ou serviço aos fornecedores.

Figura 13 - NCMM Classe “Koster” e seus sistemas de CMM.



Fonte: Wiltgen (2023).

A proposta visa assegurar uma capacidade operativa desses meios por, pelo menos, 25 anos. Os navios da Classe “Koster”, demonstram a versatilidade de operar tanto como NCM, incluindo a possibilidade de conduzir operações de caça de minas com UUV, quanto desempenhar a função de varredura de minas por sistema rebocado e por meio de um *Unmanned Surface Vehicle* (USV<sup>28</sup>), conforme proposto pela empresa sueca.

Além disso, essa nova classe de navios é multifuncional, abrangendo atividades como guerra antissubmarino, patrulha e pesquisas hidrográficas, o que ampliaria as capacidades e o aparato da MB em diversas áreas de necessidade (Alves e Lami, 2019; Padilha, 2023).

No que diz respeito aos UUVs, destaca-se a aquisição do REMUS 100 pela MB no ano de 2015, sendo esse tópico explorado com maior profundidade nos capítulos subsequentes.

Com o início do programa de desenvolvimento do futuro Submarino Nuclear Brasileiro (SN-BR) em construção no Complexo Naval de Itaguaí<sup>29</sup>, que será a futura sede desses meios (Macedo *et al.*, 2010), a MB sentiu a necessidade de aprofundar seus estudos para garantir a segurança nas entradas e saídas dos submarinos da BSIM (Gonçalves, 2021).

A área é única, com um percurso de 25 milhas náuticas da BSIM até o mar aberto e um tráfego intenso de embarcações na Baía de Sepetiba, representando uma ameaça submarina.

<sup>28</sup> *Unmanned Surface Vehicle* – Veículo de Superfície Não Tripulado, tradução nossa.

<sup>29</sup> Complexo Naval de Itaguaí – Complexo que contempla o estaleiro e a Base de Submarinos da Ilha da Madeira (BSIM) (Padilha, 2023).

Portanto, a MB enfrenta o desafio de assegurar a navegação segura e a proteção da tripulação dos submarinos (Padilha, 2023).

A partir de 2035, com a chegada do submarino de propulsão nuclear "Álvaro Alberto", a preocupação com as CMM na região aumentará. Protocolos exigirão a caça de minas e varreduras para a entrada e saída de submarinos nucleares nos portos devido ao risco de explosões de minas marítimas que poderiam causar a dispersão de combustível na natureza. Essa dispersão representaria um desastre ambiental e uma ameaça à vida humana (Gonçalves, 2021; Padilha, 2023).

Nesse contexto, é imperativo ter meios de CMM na área do Rio de Janeiro. Uma opção em consideração é transferir a sede do ComForMinVar de Salvador para Itaguaí, seguindo seu lema: "Onde a Esquadra for, nós estivemos" ou manter nesse local um destacamento permanente.

## 2.2 Unmanned Underwater Vehicles (UUVs)

Ao retroceder no tempo, observa-se que muitas informações relacionadas ao desenvolvimento dos UUVs foram dispersas ou não divulgadas ao público, havendo pouco empenho na consolidação desses dados. Ao longo das últimas décadas, vários centros de pesquisa manifestaram interesse em aprofundar o conhecimento na exploração do ambiente subaquático. Esse aumento de interesse resultou em uma crescente demanda por UUVs. Esses veículos operam submersos na água sem a necessidade de presença humana a bordo, sendo também conhecidos como "drones subaquáticos". Trata-se de submarinos não tripulados, construídos em dimensões menores e com custos mais acessíveis em comparação aos submarinos tradicionais. Para contextualizar o conceito de submarino, o livro "Arte Naval" oferece:

Os submarinos são constituídos por um casco resistente, capaz de suportar a pressão da coluna d'água, de seção circular ou quase circular, cuja forma assemelha-se à de um charuto. Nos tipos de casco duplo, este casco resistente é circundado por outro – o casco exterior – de construção adequada à propulsão na água; o espaço entre eles é utilizado para tanques de lastro e tanques de óleo combustível. Nos tipos de casco simples, todos os tanques são internos ao casco resistente (Fonseca, 2002, p.98).

Com base nas formas e na operação esses veículos são subdivididos em duas categorias: "*Autonomous Underwater Vehicle*"<sup>30</sup>(AUV) e "*Remotely Operated Underwater Vehicle*"<sup>31</sup>

<sup>30</sup> *Autonomous Underwater Vehicle* – Veículos Submarinos Autônomo, tradução nossa.

<sup>31</sup> *Remotely Operated Underwater Vehicle* – Veículos Submarinos Remotamente Operados, tradução nossa.

(ROV), também conhecidos como “robôs” (Figura 14). A principal diferença entre esses dois tipos reside no fato de que os ROVs são controlados por operadores, enquanto os AUVs são automatizados e operam de forma independente da intervenção humana direta (He; Wang; Ali, 2020, tradução nossa).

Os UUVs realizam suas missões em ambientes altamente voláteis, sujeitos à forte intervenção da natureza, correntes marítimas intensas e alta pressão da coluna d'água. Seus dispositivos são facilmente corroídos devido à exposição à água do mar. Além disso, os sistemas de navegação por satélite e os sinais de rádio têm sua utilização limitada nessas condições (Heo; Kim; Kwon, 2017, tradução nossa).

Nesta seção será abordada uma contextualização histórica do desenvolvimento dos AUVs, as subdivisões dos veículos, seus sensores e tecnologias empregados, além do uso e aplicações e as tendências destes veículos.

Figura 14- ROV Mohawk realizando missão de coleta de dados oceânicos.



Fonte: RJE International (2017).

### 2.2.1 História Cronológica do Desenvolvimento dos AUV

O primeiro veículo desenvolvido e classificado como AUV foi criado em 1957 nos Estados Unidos, no Laboratório de Física Aplicada da Universidade de Washington, e denominado *Special Purpose Underwater Research Vehicle (SPURV)*. Projetado para realizar pesquisas nas águas do Ártico, com capacidade de mergulho até 10.000 pés de profundidade, seu casco era confeccionado em alumínio, tinha formato de torpedo, era hidrodinâmico, contava

com um sistema de propulsão por hélice e controle por meio de comunicações acústicas (Gafurov e Klochkov, 2015, tradução nossa).

Na década de 1980, com o avanço dos computadores e o desenvolvimento de memórias pequenas de baixo consumo de energia, tornou-se possível implementar algoritmos complexos para orientação e controle de plataformas autônomas nos veículos. Estes avanços foram acompanhados pelo progresso na engenharia de software, possibilitando o desenvolvimento de sistemas de software complexos capazes de concretizar a visão dos desenvolvedores de sistemas (Blidberg, 2001, tradução nossa).

Para evidenciar a importância dessa implementação de algoritmos, o *National Defense Research Institute*<sup>32</sup> que é conhecido por fornecer informações e análises objetivas e baseadas em evidências para apoiar o governo dos Estados Unidos e outras entidades envolvidas em questões de defesa e segurança nacional. Ressalta que:

Os algoritmos podem ser vistos como o “cérebro” por trás das capacidades autônomas. Eles são, portanto, os blocos de construção centrais e mais críticos na busca por remover os humanos do controle. Além disso, são a ponte natural pela qual podemos conectar as capacidades autônomas às tarefas dos veículos [...] (Martin *et al.*, 2019, p.24, tradução nossa).

Conforme Gafurov e Klochkov (2015, tradução nossa), durante esse período, impulsionado pelos avanços tecnológicos, como o processador de 32 bits da Motorola entre outros avanços, as possibilidades de aprimoramento dos AUVs foram ampliadas. Isso ficou evidente no desenvolvimento do ARCS em 1983, que realizou seu primeiro mergulho em 1987. Esse AUV foi desenvolvido pela empresa *ISE Ltd.* em parceria com o *Canadian Hydrographic Service*<sup>33</sup> e o DoD. O ARCS é caracterizado pelo processador Motorola de 32 bits, permitindo o controle em tempo real e uma autonomia energética de até 35 horas. Ele foi utilizado como plataforma de testes para o desenvolvimento de novas tecnologias no campo dos AUVs.

No final dos anos 90, um grupo de cientistas do *Russian Institute of Marine Technology Problems*<sup>34</sup>, em colaboração com o *Autonomous Undersea System Institute*<sup>35</sup> (AUSI), se empenhou em incorporar painéis solares em AUVs.

Conforme Gafurov e Klochkov (2015, tradução nossa), pode-se destacar os seguintes e notáveis avanços dos AUVs em 2001:

---

<sup>32</sup> *National Defense Research Institute* – Instituto de Pesquisa de Defesa Nacional, tradução nossa.

<sup>33</sup> *Canadian Hydrographic Service* - Serviço Hidrográfico Canadense, tradução nossa.

<sup>34</sup> *Russian Institute of Marine Technology Problems* - Instituto Russo de Problemas de Tecnologia Marinha, tradução nossa.

<sup>35</sup> *Autonomous Undersea System Institute* – Instituto de Sistemas Autônomos Submarinos, tradução nossa.

**Melhorias na Autonomia:** Houve avanços na capacidade dos AUVs de operar de forma autônoma por longos períodos. Isso foi possível devido ao desenvolvimento de baterias mais eficientes e sistemas de gerenciamento de energia aprimorados.

**Aprimoramento da Navegação:** Os AUVs se tornaram mais precisos em sua capacidade de navegar e manobrar no ambiente subaquático. Isso envolveu a incorporação de sistemas de navegação avançados, como sensores inerciais, *Global Positioning System*<sup>36</sup>(GPS) subaquático e tecnologias de posicionamento acústico.

**Sensores e Instrumentação Avançados:** Houve melhorias significativas na capacidade dos AUVs de coletar dados e realizar pesquisas científicas. Novos sensores e instrumentos foram desenvolvidos para medir parâmetros oceanográficos, características do fundo do mar e até mesmo realizar inspeções submarinas.

**Comunicação Melhorada:** Os avanços na comunicação subaquática permitiram que os AUVs transmitissem dados em tempo real para centros de controle na superfície. Isso ampliou as capacidades de monitoramento e operação dos veículos autônomos subaquáticos.

**Aprimoramentos no Design e Eficiência:** O design dos AUVs também evoluiu para torná-los mais eficientes em termos de propulsão e manobrabilidade, o que permitiu que realizassem uma variedade de tarefas de forma mais eficaz.

**Expansão de Aplicações:** A capacidade dos AUVs de se adaptarem a uma variedade de missões, desde pesquisas científicas até aplicações militares, expandiu-se significativamente em 2001.

Esses avanços ajudaram a impulsionar o uso de AUVs em várias áreas, incluindo oceanografia, exploração submarina, monitoramento ambiental, pesquisa científica e defesa, tornando-os ferramentas versáteis para a exploração e a realização de tarefas em ambientes subaquáticos. Com isso, surgiu o desenvolvimento do REMUS, projetado para reconhecimento, inspeção e CMM em águas rasas. O REMUS dispunha de um vasto número de sensores e dispositivos de medição, sendo as informações coletadas transmitidas por meio de comunicação acústica até um controlador. Esse controlador é utilizado para programar as missões desse AUV, bem como traçar o curso que será navegado durante elas. A singularidade do REMUS 100 está em seu pequeno tamanho, 1,85 metros, e em seu baixo peso, 30 quilos.

Ainda na primeira década dos anos 2000, houve a modificação na família de AUV REMUS. Em sua nova geração, o REMUS 600 buscou mergulhar mais profundamente, aumentando o limite de profundidade de 100 para 600 metros. Para atingir esse objetivo, foram

---

<sup>36</sup> *Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global, tradução nossa.

necessárias modificações no peso e tamanho. A exclusividade do veículo reside na modularidade e universalidade: após a troca rápida do equipamento, é possível prepará-lo para uma nova tarefa. Além disso, com a possibilidade de instalar baterias extras, permitiu ao veículo concluir viagens de até 280 milhas náuticas. Este AUV possui três lemes de proa e revestimento de borracha que proporcionam alta estabilidade na execução da guinada. Vale ressaltar que o REMUS já se encontra na versão REMUS 6.000 (Figura 15) (Gafurov e Klochkov, 2015, tradução nossa).

Figura 15- REMUS 6000.



Fonte: Ocean News & Technology (2018).

Além dos AUVs acionados por hélice, destaca-se a existência e o desenvolvimento, não menos significativo, dos planadores subaquáticos, concebidos por cientistas militares com o propósito de criar um veículo capaz de permanecer submerso por várias semanas ou meses, apresentando menor emissão de ruídos. Esses AUVs possuem asas essenciais para a estabilização de seu movimento planador e suavização do mergulho. O conceito de planadores foi introduzido em 1955 por *Henry Stommel e Doug Webb*, e atualmente, as ideias iniciais foram incorporadas em uma variedade de modelos de planadores subaquáticos (*Wood e Inzartsev*, 2009, tradução nossa).

Ao longo desses anos, foram desenvolvidas 243 configurações exclusivas de 139 plataformas de AUVs, em diferentes tamanhos e configurações, operando em diversas profundidades. Até o momento, a profundidade máxima projetada para um AUV é de 6.000 metros, principalmente devido às anomalias causadas pela gravidade em grandes profundidades. Esse fato ocorre porque, nessas profundidades, o veículo requer intervenção manual para realizar cálculos, levando em consideração as mudanças ambientais em tempo real, uma vez que os cálculos automatizados podem ser complexos e propensos a erros (Jiang et al., 2019, tradução nossa).

Adicionalmente, observam-se testes realizados pela Rússia e China em 2020, visando ultrapassar a barreira dos 6.000 metros de profundidade. A máxima profundidade atingida foi de 10.908 metros; no entanto, esses veículos ainda necessitam passar por mais testes para comprovar sua eficácia em meio a ambientes hostis, desafiadores e limitadores de altíssimas profundidades (Agarwala, 2022, tradução nossa).

O estado da arte dos AUVs busca novos materiais e conceitos de projeto, como o emprego de fibra de carbono e o uso de "materiais inteligentes" que convertem sinais elétricos em vibrações mecânicas.

Nesse contexto, destaca-se o avanço na capacidade computacional e a miniaturização dos componentes eletrônicos, possibilitando a implementação de novos algoritmos e sendo crucial para o desenvolvimento de "micro-AUVs" e "mini-AUVs". Nesse sentido, surge a aplicação de redes neurais e inteligência artificial para viabilizar uma navegação mais inteligente, como o desvio de possíveis obstáculos durante uma rota e a viabilidade da navegação cooperativa e de enxames (Gafurov e Klochkov, 2015, tradução nossa).

Este subcapítulo do referencial teórico abordará em maior profundidade os sensores, as classificações dos UUVs e suas aplicações, com ênfase especial no âmbito militar, dedicando especial atenção à aplicação na GM.

### 2.2.2 Classificação dos UUVs

A classificação dos UUVs, pode ser feita baseada em vários parâmetros como: peso comprimento, propulsão, autonomia ou operação. O *The Navy Unmanned Undersea Vehicle Master Plan*<sup>37</sup> de 2004, (DoD, 2004, tradução nossa), categoriza os UUVs em quatro classes, baseadas no peso e autonomia, conforme a Tabela 1.

---

<sup>37</sup> *The Navy Unmanned Undersea Vehicle Master Plan* – O Plano Diretor de UUV da USN, tradução nossa.



Tabela 1 - Classificação dos UUVs por peso e autonomia energética.

S/N <sup>38</sup>	Tipo	Peso (kg)	Autonomia em Baixa Rotação (hr)	Autonomia em Alta Rotação (hr)	Diâmetro (cm)	Lançador	Exemplo
I.	UUV pequeno ou portátil	11 a 45	10 a 20	Menor que 10	Entre 7,5 e 25	Manualmente por pequenas embarcações	REMUS- 100
	Mini-AUV	20 a 100					Lagosta- robô
	Micro-AUV	Menor que 20			21,5		Peixe-robô
II.	UUV médio ou leve	225	20 a 40	10 a 20	Entre 25 e 53	Bote inflável ou guindaste de navios de superfície	Mk 18 Mod 2 (Kingfish)
III.	UUV grande ou peso pesado	1.350	40 a 80	20 a 50	Entre 53 e 210	Submarinos ou navios de superfície	Snakehead de Ph1
IV.	UUV extragrande	10.150	Mais que 400	100 a 300	Maior que 210	Navios de superfície pier	XLUUV <sup>39</sup> ou “ORCA”

Fonte: Próprio autor (2023).

É notado que o comprimento do UUV é diretamente proporcional a autonomia energética do veículo. Na Tabela 2, observa-se a classificação, de acordo com a propulsão e na Tabela 3 por suas operações.

Tabela 2 - Classificação dos UUVs por propulsão.

S/N	Propulsão	Tipos de UUVs	Exemplos
I.	Propulsão por hélice	Uso da propulsão hélice convencional	ROVs, AUVs
II.	Impulsionado por flutuabilidade	Uso da variação de flutuabilidade, sendo ajustada por uma bomba e uso do aerofólio para converter em movimento para cima e para baixo.	Gliders, Seaglider, Deepglider, SLOCUM Glider

Fonte: Próprio autor (2023).

<sup>38</sup> S/N – Serial Number, Número de Série, tradução nossa.

<sup>39</sup> XLUUV- *Extra Large Unmanned Undersea Vehicles*, Veículo Submarino Extra-grande, tradução nossa.

Tabela 3 - Classificação dos UUVs por suas operações.

S/N	Tipo	Explicação	Exemplos
I.	Rebocados	Atuam como plataformas para os diversos sensores conectados ao veículo.	Sonar rebocado
II.	Amarrados	São conectados ao navio-mãe para alimentação e operação, por um operador embarcado.	ROV
III.	Não amarrados	Não são conectados ao navio-mãe. Contém energia a bordo e podem ser controlados por um operador remoto por meio de um link de comunicação ou pré-programação.	AUV, Glider
IV.	<i>Landers</i>	São autônomos, constituído por uma estrutura metálica com instrumentos que fazem medições de propriedades físicas, juntamente com imagens, pousados no fundo do oceano.	Autonomous Lander Vehicles (ALV)
V.	Rastreadores	São autônomos, fazem imitações de criaturas do mar, e rastejam no fundo do oceano.	Robóticos Peixes, caranguejos, cobras, ou polvos

Fonte: Próprio autor (2023).

Apesar da enumeração dos tipos de classificação, é crucial compreender que é possível uma sobreposição entre essas classes, podendo resultar em um único UUV se enquadrar em várias classes.

### 2.2.3 Os principais componentes dos UUVs - Sensores

Nesta seção, serão destacadas as principais tecnologias aplicadas aos UUVs no campo dos sensores. Expondo-se uma base teórica e tecnológica, servindo de fundamento para a compreensão da metodologia deste trabalho.

Agarwala (2022, tradução nossa) traz o seguinte apontamento sobre os sensores os UUVs:

Devido ao amplo espectro de uso dos UUVs, uma gama de sensores é empregada por eles. Normalmente, esses sensores podem incluir bússolas, sensores de profundidade e biológicos (para medir a turbidez, pH, oxigênio dissolvido, clorofila, entre outros), bem como sonares, magnetômetros, termistores e sondas de condutividade (Neira *et al.*, 2021). Para simplificar a compreensão, esses sensores podem ser divididos em três grupos amplos: (a) Sensores de navegação (para detectar o movimento do veículo) que consistem em giroscópios e acelerômetros, com suporte de entrada de velocidade de três eixos do *Doppler Velocity Log*<sup>40</sup>(DVL). (b) Sensores de missão (para perceber o ambiente operacional), que medem diversas variáveis oceanográficas, como

<sup>40</sup> *Doppler Velocity Log* – Registro de Velocidade Doppler, tradução nossa.

temperatura, pressão, nitrato, condutividade e ATP (trifosfato de adenosina) total. (c) Sensores proprioceptivos (para fornecer diagnósticos do veículo), como sensores ópticos (câmera de vídeo), motores e propulsores, luminárias (para fornecer luz) e manipuladores (Agarwala, 2022, p.13, tradução nossa).

### 2.2.3.1 *Sonar*<sup>41</sup>

O sonar é um dispositivo que a partir do uso de ondas sonoras pode determinar a direção e a distância de um objeto embaixo d'água. Seu uso é mais vantajoso em comparação com os sensores ópticos no que tange as imagens subaquáticas, pois não são limitados pela distância de imagem. Logo, as informações advindas de sonares acústicos são essenciais aos UUVs (Bae e Hong, 2023, tradução nossa).

Conforme Greene *et al.* (2018, tradução nossa), as vantagens do uso da tecnologia sonar vão além da geração de imagens subaquáticas, pois essa tecnologia também pode fornecer informações essenciais para a navegação e segurança dos UUVs. Permite também detectar obstáculos e possíveis perigos subaquáticos, como minas navais ou estruturas submersas, desempenhando, assim, um papel fundamental na prevenção de acidentes e danos aos veículos.

Os dois principais tipos de sonar empregados em UUVs são o *Front-Looking Sonar*<sup>42</sup>(FLS) e o *Side-Scan Sonar*<sup>43</sup> (SSS), sendo o primeiro utilizado para detecção de objetos situados à frente do veículo, proporcionando uma visão antecipada de possíveis obstáculos. Por outro lado, o SSS é utilizado para criar imagens detalhadas do leito marinho e da área ao seu redor, mostrando a sua importância em operações de exploração submarina, busca e salvamento, e mapeamento subaquático (Reed; Petillot; Bell, 2004, tradução nossa).

No entanto, observa-se a interferência de fatores ambientais na tecnologia sonar, como temperatura, salinidade e pressão da água, constituindo um desafio à tecnologia que pode impactar na precisão e confiabilidade das leituras sonares. Além disso, os sonares podem ser suscetíveis a interferências de outras fontes sonoras do fundo do oceano, como a vida marinha ou outros veículos e navios de superfície. Com a intenção de solucionar essas fragilidades da tecnologia, cientistas e pesquisadores trabalham incessantemente no desenvolvimento de avanços na tecnologia sonar, capaz de fornecer informações com maior precisão e confiabilidade em diversas condições ambientais (Greene *et al.*, 2018, tradução nossa).

---

<sup>41</sup> Sonar – Sound Navigation and Ranging. Navegação e Determinação da Distância pelo Som, tradução nossa.

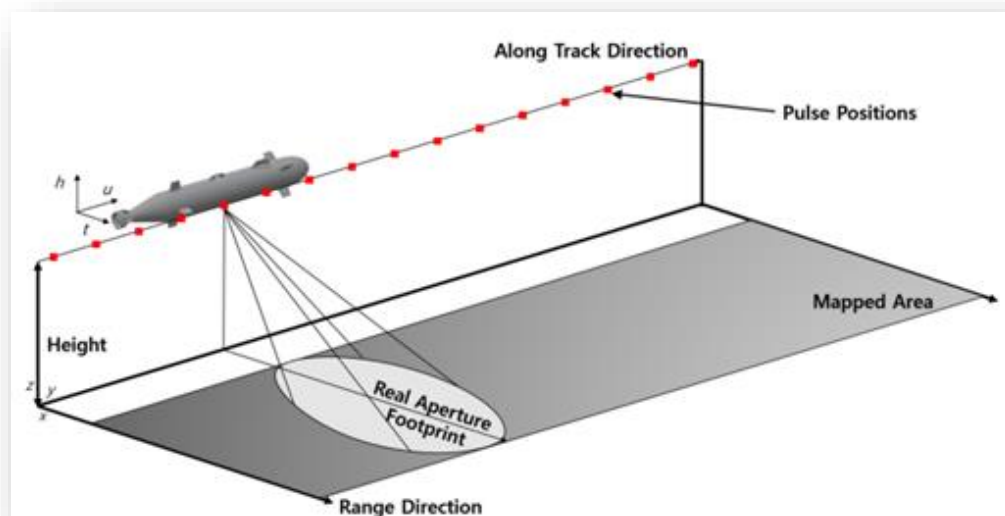
<sup>42</sup> *Front-Looking Sonar* – Sonar de Visão Frontal, tradução nossa.

<sup>43</sup> *Side-Scan Sonar* – Sonar de Varredura Lateral, tradução nossa.

### 2.2.3.1.1 Side-Scan Sonar (SSS) e Synthetic Aperture Sonar<sup>44</sup>(SAS)

O SSS é um dispositivo que representa o fundo do mar em uma imagem bidimensional por meio do uso de ondas sonoras, conforme ilustrado na Figura 16. Esse sonar gera imagens do leito marinho e é utilizado principalmente para realizar levantamentos topográficos nessas áreas. A imagem produzida pelo SSS é diferente gerada por uma imagem óptica convencional, que corresponde a uma fotografia geral. Essas imagens são definidas por realidades em áreas onde as ondas sonoras atingem objetos e são refletidas diretamente, assim como por sombras criadas em áreas onde as ondas sonoras não atingem objetos. A resolução do SSS é limitada devido à presença de vários ruídos na água, e sua faixa de operação abrange cerca de 100 a 200 metros. Nesse contexto, o SAS foi desenvolvido nos últimos anos para aprimorar a qualidade das imagens, representando a aplicação da ideia do radar de abertura sintética no contexto do sonar (Reed; Petillot; Bell, 2004, tradução nossa).

Figura 16 - Ilustração de um sistema de SSS.



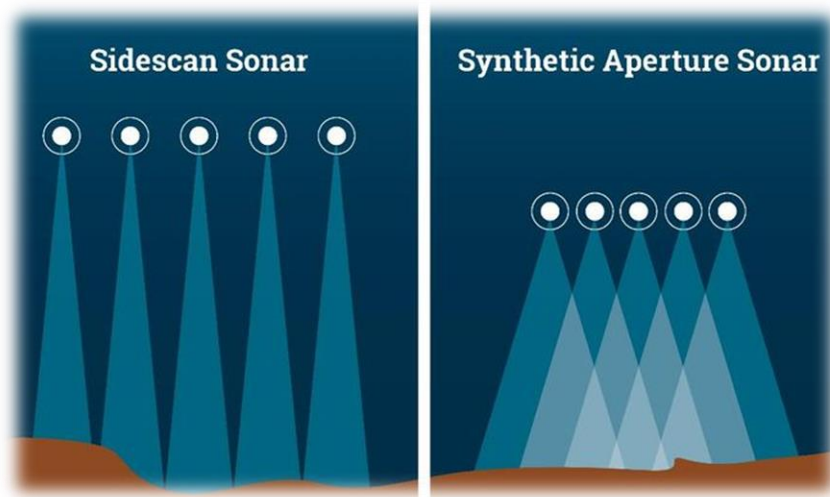
Fonte: Callow (2003).

Segundo Callow (2003, tradução nossa), o SAS surgiu com o avanço na resolução das imagens, com a combinação de várias aberturas por meio do processamento de sinais, superando a limitação física do comprimento da matriz do SSS em mais de 10 vezes, representando uma melhoria significativa quando comparada ao SSS. Em particular,

<sup>44</sup> Synthetic Aperture Sonar – Sonar de Abertura Sintética, tradução nossa.

considerando as informações de manobra do sonar, a resolução pode ser ampliada, como se fosse uma imagem sonar alcançada usando uma abertura fisicamente grande, adicionando medições anteriores à medição atual para criar uma imagem sonar. Sobretudo, os SAS são instalados em UUVs para fins de exploração, e a comunicação subaquática nessas regiões exploradas são normalmente limitadas. Entretanto, por limitação de transmissão e acesso, essas imagens de alta resolução não conseguem chegar até o operador, conseqüentemente, as imagens obtidas pelo SAS ficam indisponíveis até que a exploração esteja completa. Uma descrição da diferença das operações com esses dois tipos de sonares é ilustrada na Figura 17.

Figura 17 - Com o SSS (à esquerda), cada pulso mede uma área distinta e separada do fundo do mar. Em contraste, os pulsos do SAS (direita) se sobrepõem uns aos outros e medem cada área mais de uma vez. Isso aumenta artificialmente o alcance da matriz.



Fonte: NOAA Ocean Exploration (*/s.d./*).

#### 2.2.3.1.2 *Front-Looking Sonar (FLS)*

O FLS é um tipo de sonar utilizado em sistemas de navegação marítima, projetado para detectar obstáculos à frente de um navio ou UUV. Ele apresenta um peso variando entre 14 e 36 quilos e um consumo de energia de aproximadamente 15 a 30 watts. O FLS é capaz de detectar objetos a uma distância de centenas de metros, sendo que essa variação depende do tamanho e da forma do objeto, bem como das propriedades acústicas da água circundante. Alguns sistemas FLS podem ser integrados a outros sistemas de navegação, como radar ou GPS, proporcionando uma consciência situacional mais abrangente e aprimorando a capacidade de evitar obstáculos (Loggins, 2001, tradução nossa).

Por meio dos avanços tecnológicos dos sensores, espera-se que os sistemas FLS se tornem ainda mais precisos e eficientes em termos de energia, possibilitando assim abranger uma gama mais ampla de embarcações e veículos não tripulados que fazem uso desse sistema. O funcionamento do FLS baseia-se na transmissão de um sinal acústico e, posteriormente, no cálculo do tempo até sua recepção, permitindo ao sistema detectar e localizar possíveis empecilhos no trajeto designado, contribuindo para evitar colisões ou outros acidentes (Loggins, 2001, tradução nossa).

### 2.2.3.2 *Doppler Velocity Log (DVL)*

Devido à baixa propagação de ondas de rádio debaixo d'água, a localização não pode ser determinada pelo uso do GPS. Portanto, sensores de navegação utilizando sistemas de observação ultrassônicos são instalados em vários veículos marítimos e usados para estimar a posição. Entre eles, destaca-se o DVL, um representativo sensor de navegação auxiliar que utiliza o efeito Doppler para medir a velocidade. Ele realiza o cálculo da velocidade relativa entre a área de água e o dispositivo, utilizando a variação de frequência Doppler do sinal sonoro que é refletido e retorna do fundo do mar (Tal; Klein; Katz, 2017, tradução nossa).

Figura 18 - DVL.



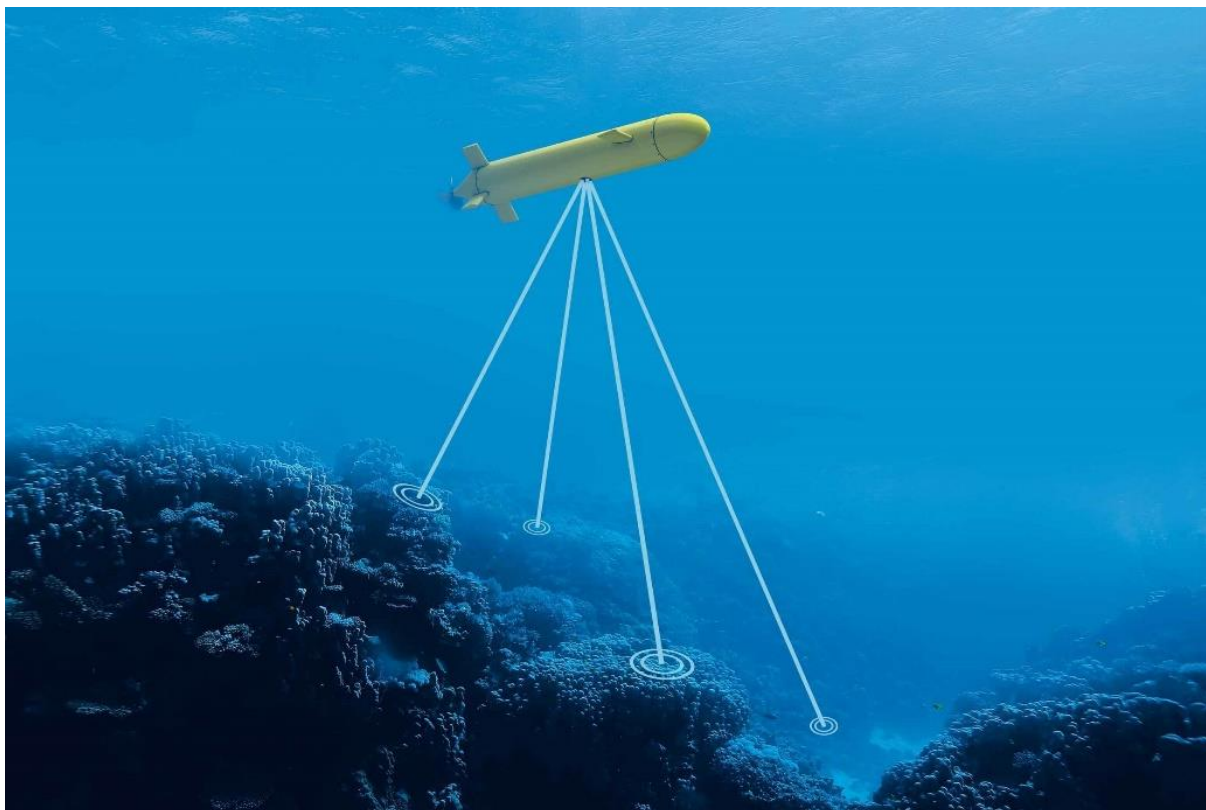
Fonte: Nortek (2023).

## 2.2.4 Navegação dos AUVs

A navegação emerge como um dos principais desafios que limitam a capacidade dos AUVs, devido ao fato de que a qualidade dos dados resultantes de levantamentos com esses veículos está intrinsecamente ligada à precisão desses dados, minimizando o ruído e garantindo um posicionamento de referência preciso, sem deslocamentos indesejados. A busca por uma precisão ainda maior impulsionou o desenvolvimento de sistemas de *transponders* acústicos, uma inovação que, embora benéfica em termos de precisão, também foi comprovada em um aumento nos custos operacionais, conseqüentemente, melhorando os problemas de precisão encontrados na navegação estimada dos primeiros AUVs (Blidberg, 2001, tradução nossa).

No que diz respeito à navegação acústica, ela depende da troca de sinais acústicos entre um conjunto de balizas e o AUV para obter a estimativa de posição. Esses veículos navegam com o uso de sistemas acústicos de posicionamento subaquático, como o *Long Baseline* (LBL), *Short Baseline* (SBL) e *Ultra Short Baseline* (USBL). O sistema LBL é caracterizado quando há uma rede de transponders no leito marinho. Por outro lado, o sistema SBL é semelhante ao LBL, exceto pelo fato do ponto de referência ser montado em uma plataforma fixa na superfície, como um navio, e utilizar, por exemplo, o GPS como referência para o cálculo das coordenadas do AUV. Já os sistemas USBL são caracterizados pela miniaturização do transceptor, contendo normalmente três ou mais transdutores separados por uma linha base curta, de cerca de 10 cm, montado sob um navio de superfície, a Figura 19 ilustra a navegação baseada por esses sistemas acústicos (Zhang et al., 2023, tradução nossa).

Figura 19 - AUV realizando navegação baseada em sistemas de posicionamento acústico.



Fonte: Nortek (2023).

O *Global Navigation Satellite System*<sup>45</sup> (GNSS) é uma ferramenta importante para fornecer uma solução de navegação segura. No entanto, devido à forte atenuação, os sinais do GNSS não estão disponíveis em ambientes subaquáticos profundos, o que limita o seu uso na navegação dos AUVs. Embora as operações periódicas de ressurgimento à superfície possam permitir que o GNSS auxilie na navegação dos AUVs, esse comportamento é frequentemente indesejável para algumas missões, como levantamentos em águas profundas, devido ao significativo consumo de energia gasto para trazer o AUV a superfície. Às vezes, isso pode até ser impossível, por exemplo, quando o AUV está sob uma superfície de gelo ou em áreas com tráfego marítimo intenso. No entanto, o GNSS pode ser usado na calibração de sensores, como o DVL. Além disso, nas operações de recuperação dos AUVs, o sistema ajuda a posicionar e/ou localizar o AUV quando ele vem à superfície (Claus e Bachmayer, 2015, tradução nossa).

Nos últimos anos, vários pesquisadores exploraram a aplicação de sinais eletromagnéticos na navegação subaquática, com base em ondas eletromagnéticas de baixa frequência que podem se propagar debaixo d'água, sendo a orientação de navegação

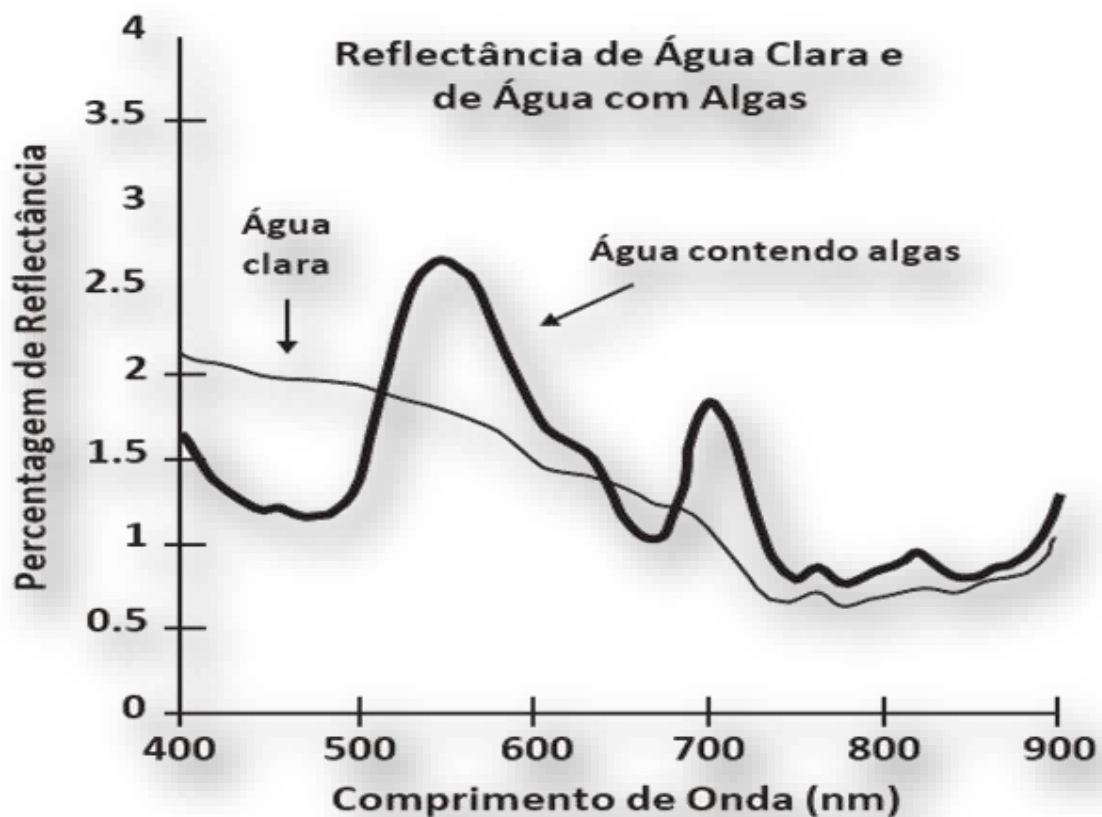
---

<sup>45</sup> *Global Navigation Satellite System* – Sistema Global de Navegação por Satélite, tradução nossa.



eletromagnética. Uma característica positiva das ondas eletromagnéticas é que a reflexão e a difração dessas ondas podem ser ignoradas devido à sua grande atenuação, conforme a Figura 20 (Ribeiro, 2023). Pesquisas recentes indicam a possibilidade de ampliar a aplicação de sinais eletromagnéticos em ambientes subaquáticos (Kato et al., 2021, tradução nossa). No entanto, é importante destacar que o desenvolvimento de sistemas de navegação específicos baseados em ondas eletromagnéticas exigirá esforços específicos.

Figura 20 - Reflectância de Água Clara e de Água com Algas em relação ao comprimento de onda eletromagnética.



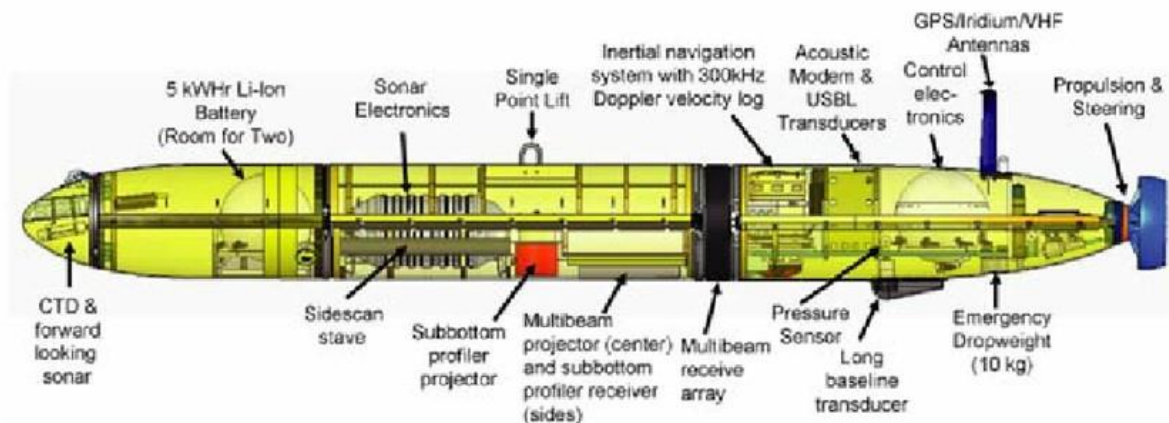
Fonte: Ribeiro (2023).

Um dos sistemas de posicionamento amplamente adotados pelos AUVs combina um sistema de navegação inercial (SNI) com medições de efeito Doppler. Esse método utiliza emissões de ondas acústicas para obter dados de velocidade de objetos a certa distância. Funciona emitindo um sinal de micro-ondas e analisando como o movimento do objeto afeta a frequência do sinal refletido. Essas variações fornecem medições diretas e altamente precisas da componente radial da velocidade de um alvo em relação ao radar. Os radares Doppler têm aplicações em diversas áreas, incluindo aviação, satélites de sonorização, meteorologia, pistolas

de radar, radiologia, entre outros. Além disso, o SNI permite medir a velocidade de deslocamento do veículo (Vaganay; Bellingham; Leonard, 1998, tradução nossa).

A navegação inercial pré-programada manifesta um erro de baixa frequência que aumenta ao longo do tempo, exigindo o apoio de sensores para manter os erros minimizados. Esses sensores auxiliares incorporam pequenos componentes de erro de baixa frequência, permitindo a correção da diferença na navegação e posicionamento a longo prazo da navegação inercial. Em veículos como o HUGIN da *Kongsberg* e embarcações de apoio, os sensores auxiliares incluem o *Differential GPS-High Precision Acoustic Position*<sup>46</sup>(DGPS-HiPAP), o DVL, o sensor de pressão para medição da profundidade e o *Gyrocompass*. Além disso, as medições de rolagem e inclinação provenientes de uma *Motion Reference Unit* (MRU) são usadas para inicializar a navegação inercial. O DVL, *Gyrocompass* e MRU também desempenham o papel de sistemas de backup para a navegação estimada (Mandt; Gade; Jalving, 2001, tradução nossa). Figura 21, é ilustrado alguns dos sensores de navegação dos AUVs.

Figura 21- Sensores de Navegação de um AUV.



Fonte: Caress (2008).

### 2.2.5 Autonomia

A automação e autonomia desempenham um papel crucial em sistemas não tripulados, em contraste com sistemas tripulados, nos quais o operador controla diretamente o veículo e percebe todo o ambiente ao seu redor, podendo, assim, responder de forma imediata. No entanto, em um sistema não tripulado, todas as mudanças no ambiente são bloqueadas apenas pelos dispositivos de sensoriamento de bordo, e a identificação da situação e a resposta são

<sup>46</sup> *Differential GPS-High Precision Acoustic Position* - GPS Diferencial – Posicionamento Acústico de Alta Precisão, tradução nossa.

relativamente lentas porque o estado do ambiente é transmitido por meio de comunicação sem fio. Portanto, os veículos não tripulados estão direcionando seus esforços para alcançar maior automação. Isso envolve o desenvolvimento de sistemas de navegação, controle e direcionamento de longo prazo para o desempenho da missão, com o objetivo de maximizar a eficiência operacional por meio da comunicação e complementação com vários tipos de equipamentos (Bae e Hong, 2023, tradução nossa).

Conforme Martin *et al.* (2019) observaram, a pesquisa recentemente se expandiu para além da direção autônoma, na qual as máquinas controlam e operam automaticamente de acordo com as configurações de um ser humano, para veículos especializados com direção autônoma que operam independentemente, sem a intervenção de humanos ou assistência de outros dispositivos. Isso deve principalmente ao aumento na capacidade de processamento e miniaturização de componentes eletrônicos. No entanto, os veículos não tripulados estão passando por um período de transição, evoluindo de sistemas automatizados para sistemas independentes. A seguir, será apresentado pela Tabela 4 os níveis de autonomia dos UUVs.

Tabela 4 - Níveis de autonomia dos UUVs.

<b>Nível de Autonomia</b>	<b>Características</b>
Sem autonomia	Totalmente teleoperado.
Assistência robô	Algumas funcionalidades automatizadas fornecidas, por exemplo, manter a profundidade com controle pelo operador.
Autonomia de tarefas	Executa movimentos sob orientação, por exemplo, deslocar-se entre dois pontos predefinidos.
Autonomia condicional	O ser humano seleciona as opções recomendadas pelo UUV.
Alta autonomia	O UUV planeja e executa a missão com base nas amplas condições de fronteira especificadas pelo usuário, sem controle do operador.
Autonomia total	Não requer entrada humana. É implantado no ambiente de forma independente.

Fonte: Agarwala (2022).

## 2.2.6 Aplicações dos UUVs

No caso dos UUVs, foram realizados ao longo do tempo desenvolvimentos com financiamentos públicos e privados, abrangendo diversos campos e finalidades. As aplicações

desses veículos podem ser categorizadas em ramos comerciais, científicos e militares (Zhang *et al.*, 2023, tradução nossa). Esta seção abordará cada uma dessas aplicações dos UUVs, e suas respectivas missões.

### 2.2.6.1 *Campo Comercial e Científico*

Na Tabela 5, são apresentadas as missões e relevância das aplicações dos UUVs no Campo Comercial e Científico.

Tabela 5 – Missões e relevância dos UUVs no Campo Comercial e Científico.

<b>Campo</b>	<b>Missões</b>	<b>Relevância</b>
Comercial	Indústria de Petróleo e Gás ( <i>Offshore</i> ) Inspeção e Implantação de Cabos Submarinos Inspeção de Infraestruturas Subaquáticas Recuperação de Equipamentos Inspeções da Indústria Nuclear Aquicultura Reparo e Manutenção de Estruturas Subaquáticas	São missões claramente não militares, sendo importantíssimas para o andamento da economia global, visto que, muitas delas estão relacionadas a indústria e ao setor de energia.
Científico	Observação Oceânica Arqueologia Marinha Coleta de Dados Batimétricos Mapeamento do Fundo do Mar Monitoramento Ambiental Estudos Físicos, Biológicos e Químicos Pesquisa Geológica Exploração de Ambientes de Condições Extremas	As missões com UUVs nesse campo, são de fundamental importância para expansão do conhecimento sobre o oceano e ambiente marinho, possibilitando o acesso a áreas inacessíveis, realizando a coleta de dados para pesquisas científicas.

Fonte: Próprio autor (2023).

### 2.2.6.2 *Campo Militar*

Na Tabela 6, são apresentadas as missões e a relevância das aplicações dos UUVs no campo militar.

Tabela 6 – Missões e relevância dos UUVs no Campo Militar e Características das Missões.

S/N	Missões	Relevância
I.	<i>Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance</i> <sup>47</sup> (ISR)	As aplicações militares dos UUVs foram delineadas no <i>The Navy Unmanned Undersea Vehicle Master Plan</i> , de 2004. Então, as missões
II.	CMM	desses veículos no campo militar foram definidas e refinadas várias
III.	Guerra Anti-Submarino	vezes, em resposta às contínuas alterações nas ameaças e à constante
IV.	Inspeção e Identificação	evolução da tecnologia (DoD, 2004, tradução nossa). Isso possibilitou
V.	Oceanografia	a classificação de categorias específicas de missões, priorizando-as na
VI.	<i>Communication / Navigation Network Node</i> <sup>48</sup> (CN3)	ordem da coluna S/N desta tabela (Button, 2009, tradução nossa).
VII.	Entrega de Carga Útil	
VIII.	Operação de Informação	
IX.	Ataque de Tempo Crítico	

Fonte: Próprio autor (2023).

Devido ao fato deste trabalho ter um foco na GM, no Capítulo 3 deste referencial teórico, a relação dos UUVs com as CMM será abordada de forma mais aprofundada.

## 2.3 O Binômio UUV e GM

As minas navais, inegavelmente, representam dispositivos de baixo custo e alta eficácia usados na guerra naval. Suas descobertas são destacadas pelo fato de poderem ser implantadas a partir de diversas plataformas, como navios de superfície, submarinos ou até mesmo aeronaves, amplificando assim seu potencial de impacto. Quando usado para fins defensivos, geralmente serve para proteger áreas costeiras contra intrusões hostis. Em contrapartida, quando empregados para fins ofensivos, desempenham um papel crítico, interrompendo rotas de abastecimento marítimo ou impedindo o uso de instalações portuárias (Bovio, 1999, tradução nossa).

Conforme ressaltado por Bovio (1999, tradução nossa), dependendo do objetivo tático e do tipo de fabricação, as minas podem ser lançadas em todas as faixas de profundidade, desde a superfície até várias centenas de metros. Embora as minas modernas possam ser altamente sofisticadas, também as minas antigas e muito simples, com fusíveis de contato físico, ainda podem representar uma ameaça considerável, como demonstrada na Guerra do Golfo. O

<sup>47</sup> *Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance* - Inteligência, Vigilância e Reconhecimento, tradução nossa.

<sup>48</sup> *Communication / Navigation Network Node* – Nó de Rede de Comunicação / Navegação, tradução nossa.

tamanho, a forma e o material das minas modernas tornam sua detecção e neutralização uma tarefa desafiadora. Além disso, quando as minas estão enterradas nos sedimentos do fundo, seja por processos naturais ou por dispositivos de autoenterramento, elas se tornam praticamente indetectáveis pelos sensores.

Os sistemas de CMM utilizados para detecção e destruição de minas são, em geral, sofisticados e com alto custo. Em termos gerais, os NCMM são meios de superfície acusticamente silenciosos, de design não magnético, que servem como plataforma para sonares de detecção montados no casco ou de profundidade variável, podendo ser fornecidos com UUVs para identificação e neutralização de minas. No entanto, é importante ressaltar que a decisão final sobre a classificação de um objeto que se assemelha a uma mina, detectada pelo sonar, como eficazmente sendo uma mina ou não, é de responsabilidade de um operador humano. No contexto da identificação, o uso de USVs cooperando autonomamente com os UUVs também é aplicado nas CMM, sendo programados por algoritmos sem a necessidade de intervenção humana (Agarwala, 2022, tradução nossa).

Thompson (2015, tradução nossa), relata sobre a transição dos meios de CMM, com um foco na preservação da vida humana:

As operações de desminagem são extremamente perigosas. Frequentemente, é necessário que os humanos adentrem uma área minada para neutralizar as minas. Felizmente, à medida que sistemas não tripulados mais avançados são implementados, a necessidade de presença humana em áreas minadas diminui. As pesquisas atuais em contramedidas de minagem estão voltadas principalmente para o design e autonomia do UUV. A detecção autônoma in loco é uma área de interesse. O sonar de abertura sintética (SAS) está se tornando o novo padrão para os sonares de UUV, substituindo o sonar de varredura lateral. Essa atualização permite que os UUVs colem imagens com resolução significativamente superior, o que é mais adequado para algoritmos de reconhecimento de alvos (Thompson, 2015, p.29, tradução nossa).

A detecção confiável de minas modernas, incluindo aquelas posicionadas no leito marinho, proporciona maior segurança para navios e suas tripulações, ao mesmo tempo em que aprimora a eficácia na busca por áreas críticas. As forças de CMM estão cada vez mais envolvidas em conflitos regionais e operações de manutenção da paz em águas litorâneas, oferecendo apoio a desembarques anfíbios. Como consequência, além dos requisitos gerais listados acima, esses sistemas têm a capacidade de realizar operações clandestinas ou de baixa visibilidade em águas muito rasas ou na zona de rebentação.

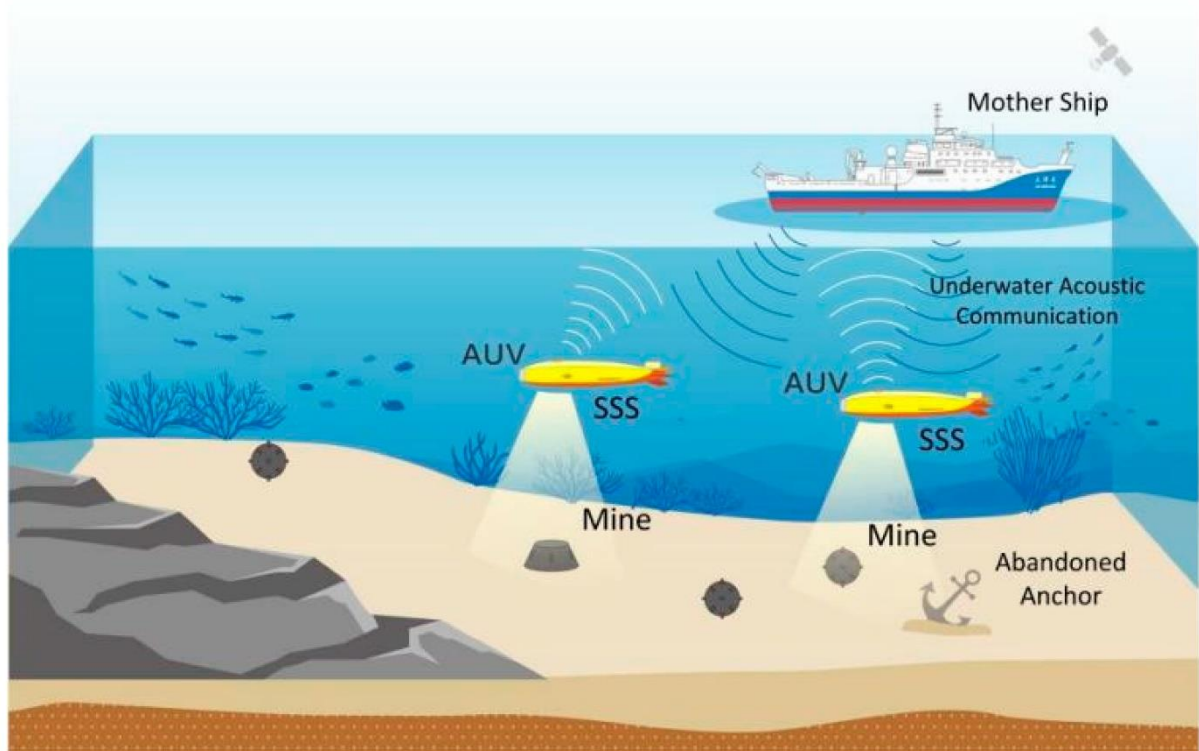
A ameaça representada pelas modernas minas navais, tanto nas situações atuais quanto nas futuras, exige uma capacidade aprimorada de detecção externa e o estabelecimento de maiores distâncias de segurança. Nesse contexto, os UUVs apresentam o potencial técnico para

atender a esses requisitos operacionais e, em alguns casos, fornecer a única maneira viável de realizar as CMM. As principais vantagens dos UUVs residem em sua capacidade de operar discretamente em áreas onde ativos tripulados integrados às marinhas não podem ser empregados, devido às ameaças significativas ou situações em que a exposição a riscos é inaceitável, como em um CM, reduzidas assim a possibilidade de baixas entre militares e meios. Além disso, destaca-se a capacidade desses veículos de atuarem como sensores remotos, coletando informações valiosas (Dissanayake e Costa, 2023, tradução nossa).

### 2.3.1 CMM com UUVs

No início do século XXI, a USN percebeu a necessidade de estabelecer uma norma para abordar todos os aspectos dos UUVs relacionados à marinha. Dessa forma, foi criado o *The Navy Unmanned Undersea Vehicle Master Plan* em 2004. Todos os conceitos desta seção serão fundamentados nos princípios deste plano americano, uma vez que ele servirá como norma base para muitas outras marinhas ao redor do mundo. A Figura 23 ilustra uma operação de CMM com UUVs.

Figura 22- Ilustração de uma operação de CMM com UUVs.



Fonte: Tang *et al.* (2023).

Em Evangelio *et al.* (2012, tradução nossa) e DoD (2004, tradução nossa), os requisitos das missões de CMM com UUVs são impulsionados pela necessidade das marinhas de estabelecerem rapidamente áreas de operação seguras, criar corredores de trânsito e rotas amplas em ambientes marítimos diversos. Essas áreas incluem:

- *Sea Lines of Communication*<sup>49</sup>(SLOC);
- Áreas Operacionais Marítimas *Offshore*;
- Áreas Operacionais Anfíbias; e
- Áreas de Penetração Litorânea.

O tamanho dessas áreas varia entre 100 e 900 milhas náuticas quadradas e abrange toda a coluna d'água, desde os CM em águas profundas até a praia, em apoio às operações anfíbias. É notável a importância de uma operação de CMM com UUV nessas áreas ser expedita; no entanto, são necessários de 7 a 10 dias, ou menos, para a conclusão dessas tarefas. Claramente, quanto mais rápido, melhor. Essas operações precisam ser concluídas antes que a maioria das embarcações chegue à área, portanto, o transporte, o controle e o reabastecimento de ativos de CMM são pontos-chave no conceito de operações (Evangelio *et al.*, 2012, tradução nossa).

De fato, a natureza das operações convencionais de CMM torna-se mais complexa e preocupante à medida que se aproxima da costa. Operações em áreas amplas, afastadas da costa, não sinalizam claramente a intenção das forças marítimas, ao contrário das operações próximas à costa. Nesse cenário, torna-se cada vez mais claro que a tática de decepção operacional, que consiste em aparentar espalhar as operações por uma área tão vasta que o verdadeiro objetivo não pode ser discernido, pode muitas vezes ser tão eficaz quanto as operações totalmente clandestinas. Isso pode, em alguns casos, levar a uma flexibilização de algumas restrições em termos de engenharia e custos (Evangelio *et al.*, 2012, tradução nossa).

Segundo Button (2009, tradução nossa), nem todas as operações de CMM serão clandestinas, mas é necessário ter a capacidade de executá-las. As missões específicas incluem:

- Reconhecimento (*i.e.*, detecção de minas, classificação, identificação e localização)
- Limpeza (*i.e.*, neutralização e liberação da área)
- Varredura mecânica e de influência
- Proteção (*i.e.*, falsificação e interferência)

Adicionalmente, outras áreas de missões contribuem para as operações de CMM. Um exemplo relevante é a *Intelligence Preparation of the Battlespace*<sup>50</sup> (IPB), que pode ser

---

<sup>49</sup> *Sea Lines of Communication* – Linhas de Comunicação Marítima, tradução nossa.

<sup>50</sup> *Intelligence Preparation of the Battlespace* – Preparação de Inteligência do Espaço de Batalha, tradução nossa.



realizada junto a uma variedade de ativos de ISR. Esses ativos podem indicar se depósitos de minas foram acessados, minas se deslocaram, plataformas lançadoras de minas foram carregadas ou operações de minagem foram realizadas, possibilitando, assim, ações contra essas ameaças antes de sua implantação (Evangelió *et al.*, 2012, tradução nossa).

De acordo com o DoD (2004, tradução nossa), os UUVs coletam dados oceanográficos muito antes de operações hostis, para fornecer informações sobre ventos, batimetria, visibilidade da água, correntes, ondas, parâmetros geofísicos do fundo do mar, concentrações de algas, bancos de areia etc. Isso é crucial para determinar áreas mináveis. Além disso, levantamentos preliminares do fundo do mar podem ser comparados às pesquisas atuais para determinar mudanças e determinar se esses novos contatos podem ser identificados como minas.

As CMM talvez sejam uma das tarefas mais complexas enfrentadas pelos UUVs. A proliferação de tipos de minas, sua disponibilidade para potenciais adversários, sua facilidade de uso em diversas profundidades de água e a natureza das operações de CMM, nas quais não há tolerância para erros. Esses fatores se combinam para criar um dos desafios mais significativos em termos de garantir o acesso seguro às áreas marítimas. Por outro lado, os UUVs pequenos são empregados com sucesso em apoio a missões de CMM (Evangelió *et al.*, 2012, tradução nossa).

### 2.3.1.1 *Estratégia de Operações*

As funções de CMM adequadas aos UUVs são a caça de minas e a neutralização, sendo elas subdivididas nas fases de detecção, classificação, identificação e neutralização.

Para determinar as táticas ideais para o emprego de UUVs, as múltiplas fases da operação de caça às minas foram examinadas, considerando cada uma das "etapas" em diferentes combinações. As combinações foram restritas àquelas que poderiam ser executadas em uma ou duas passagens, com os passos organizados em ordem crescente de informações, incluindo a etapa de neutralização (DoD, 2004, tradução nossa).

Acordo Evangelió *et al.* (2012, tradução nossa), a estratégia composta por múltiplas etapas, abrangendo detecção, classificação e identificação, foi minuciosamente examinada com o objetivo de determinar uma estratégia eficiente para o emprego de UUVs. Se desejar realizar várias etapas de detecção, elas podem ser realizadas em uma única passagem ou em várias passagens. No entanto, devido às variações nos alcances dos sensores para cada etapa da caça

de minas, a realização de várias etapas em uma única passagem exige que o veículo se desvie de sua trajetória para investigar contatos, o que reduz a taxa de cobertura de área.

Conforme documentado pelo DoD (2004, tradução nossa), em estratégias de várias passagens, um exemplo em estratégias de várias passagens, um exemplo seria um veículo detectando e classificando, enquanto um segundo veículo seguiria para identificar os objetos classificados como "semelhantes a minas" e neutralizar aqueles considerados minas. A princípio, realizar todas as fases em uma única passagem pode parecer a abordagem mais rápida. No entanto, é importante notar que essa análise revela que, em distâncias maiores, a manobra adicional exigida devido à maior densidade de contatos dos sensores de longo alcance atinge um ponto de retornos decrescentes.

Por esse motivo, sistemas de detecção e classificação que operam ambas as etapas em uma única passagem, não são recomendados para uma operação eficiente contra alvos no fundo do mar, especialmente em ambientes de alta perturbação. Uma das preocupações aqui é determinar se é mais eficiente, no geral, gastar tempo na fase de classificação, reduzindo assim falsos alarmes que precisariam ser readquiridos e identificados em uma passagem subsequente, ou se é mais eficaz utilizar o tempo extra na passagem de reaquisição e identificação (Button, 2009, tradução nossa).

### 2.3.2 Autonomia nas *Kill Chains* Existentes em CMM com UUVs

O uso do termo *kill* não significa que o resultado do processo seja a morte física de alguém ou de algo. Em vez disso, sugere que várias etapas relacionadas do processo levarão a um resultado definitivo e desejado. Embora o termo *kill chain* seja utilizado em diversos documentos e compreendido pela maioria dos usuários, não parece haver uma definição doutrinária estrita para o termo. Entretanto, em várias áreas de combate, as etapas de uma *kill chain* frequentemente envolvem alguma combinação de atividades, como identificação de alvos, fixação e conclusão, ou, de forma mais ampla, a preparação de inteligência, detecção, localização, seleção de alvo e engajamento. A abordagem da *kill chain* tem sido aplicada para descrever processos que variam desde o direcionamento de indivíduos de alto valor até o aprimoramento da prontidão das forças (Martin *et al.*, 2019, tradução nossa).

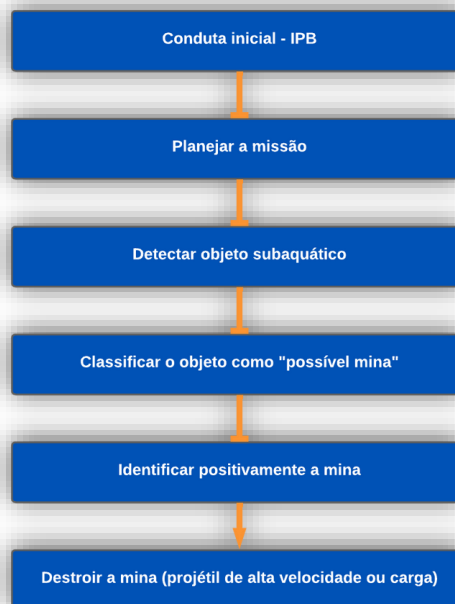
A maior parte das *kill chains* tem início com a IPB, que, como visto anteriormente neste trabalho, faz uma análise completa da área de operações de interesse, sendo este processo fundamental para a execução eficiente das etapas subsequentes. A seguir, serão abordadas as

*kill chains* dos dois tipos básicos de CMM, a caça de minas e a varredura (Martin *et al.*, 2019, tradução nossa; Thompson, 2015, tradução nossa).

### 2.3.2.1 *Atuais Kill Chains de Caça de Minas*

Nas palavras de Martin *et al.* (2019, tradução nossa), a *kill chain* para os modernos UUVs de CMM é melhor representada como sequencial, com pouca oportunidade de sobreposição, Figura 24. A mesma *kill chain* geral aplica-se tanto para minas de fundeio quanto para minas de fundo, embora o mecanismo de neutralização possa ser diferente. Esses processos exigem muita mão de obra, e a *kill chain* pode levar até uma hora para ser concluída para uma única mina. Dado que pode haver milhares de falsos contatos, semelhantes a minas, em um determinado leito oceânico, os prazos para a limpeza de minas em alguns ambientes podem ser longos e extensos. Além disso, devido à natureza sequencial desses processos, os UUVs precisam reidentificar cada mina várias vezes, aumentando o risco de perder o contato com a mina caso ocorram mudanças nas condições ambientais ou se o sensor de reidentificação não estiver otimizado para o ambiente.

Figura 23 - *Kill chain* usada na caça de minas com UUVs.



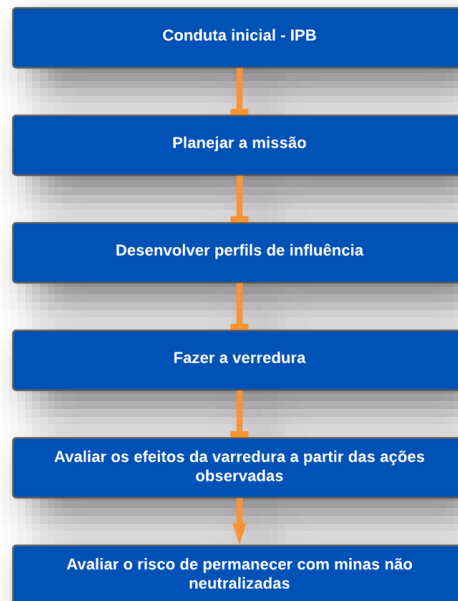
Fonte: Martin *et al.* (2019).

### 2.3.2.2 *Atuais Kill Chains de Varredura de Minas*

Condições ambientais adversas, como o enterramento de minas, visibilidade da água ou má qualidade acústica, podem comprometer a eficácia da caça de minas. Em águas muito rasas, as CMM baseada em acústica podem ser totalmente inviáveis. Quando a caça de minas não é praticável, os meios de contramedidas podem ser obrigados a realizar a varredura de minas. Atualmente, não existe nenhum meio de varrer uma mina acionada por pressão, exceto navegando com uma embarcação capaz de gerar uma assinatura de pressão suficiente para ativar a mina (Martin *et al.*, 2019, tradução nossa).

A *kill chain* usada na varredura de minas, Figura 25, apresenta semelhanças com a caça de minas, embora não inclua a etapa de identificação positiva da mina, e infelizmente, não há uma maneira real de saber se a varredura foi eficaz se nenhuma mina de influência for ativada. A falta de ativação pode ocorrer devido à ausência real de minas na área ou porque a varredura não replicou adequadamente a influência necessária. Dado que a varredura de minas é realizada devido a condições desfavoráveis para sensores, não é possível confirmar a presença de minas no fundo do oceano (Martin *et al.*, 2019, tradução nossa).

Figura 24- *Kill chain* usada na varredura com UUVs.



Fonte: Martin *et al.* (2019).

### 2.3.3 CMM com UUVs na Operação *Iraqi Freedom*

Em Magnoli (2011) e Rios (2005, tradução nossa), no período de março de 2003, enquanto as forças de coalizão terrestre mantinham operações ofensivas para a derrubada de Saddam Hussein<sup>51</sup> no Iraque. Concomitantemente, as forças navais e os meios de ajuda humanitária enfrentaram uma ameaça constante representada pelas minas navais inimigas lançadas nas águas sob jurisdição iraquiana. Em um dos cenários, 68 minas foram localizadas e neutralizadas na costa daquela região por uma força de CMM combinada por EUA, Reino Unido e Austrália.

Não obstante, diferentemente das experiências adversas vivenciadas durante a Guerra do Golfo de 1990-1991, quando os meios navais da coalizão internacional liderada pelos EUA sofreram sérios danos devido às minas navais iraquianas, as operações de CMM realizadas durante a Operação *Iraqi Freedom* foram consideradas exitosas. Este sucesso foi, em grande parte, atribuído à introdução de novos sistemas nas CMM, implantados para auxiliar nas operações, como os AUVs REMUS 100, Figura 26.

Figura 25 - REMUS 100.



Fonte: WHOI ([s.d.]).

Embora esses veículos à época, ainda estarem tecnicamente em fase de pesquisas, o destacamento de operação de veículos não tripulados da USN utilizou esses UUVs com sucesso,

---

<sup>51</sup> Saddam Hussein – Estadista e político, que se manteve na presidência do Iraque de 16 de julho de 1979 a 9 de abril de 2003 (Post e Baran, 2004, tradução nossa).

realizando reconhecimento e auxiliando nas operações de limpeza no norte do Golfo Pérsico, na redondeza do porto de Umm Qasr. Dessa forma, viabilizaram o tráfego marítimo naquela área, para posteriormente os meios navais da coalizão e os navios auxiliares de fins humanitários atracassem aquele estratégico porto (DoD, 2014, tradução nossa).

Cabe ressaltar, que o lançamento desses UUVs pela frota foi a partir de embarcações orgânicas, permitindo às forças de CMM conseguirem um incremento de permanência no local (até 22 horas a 3 nós ou 8 horas a 5 nós), permitindo uma cobertura de até 60 milhas náuticas em uma única missão, a profundidades de até 100 metros (Rios, 2005, tradução nossa).

É importante destacar que as condições ambientais no porto de Umm Qasr eram notoriamente desfavoráveis para as operações de CMM. As águas eram rasas, turvas e repletas de detritos, tornando as detecções acústicas substancialmente prejudicadas. Além disso, a presença de lama comprometeu significativamente a eficácia das detecções. As fortes correntes de maré também adicionavam um grau adicional de complexidade, tornando as operações de mergulho e a neutralização das minas detectadas um trabalho meticuloso, lento e desafiador (DoD, 2014, tradução nossa).

Para enfrentar esses fatores ambientais adversos, assim que alvos semelhantes a minas navais eram detectados e classificados pelos sofisticados SSS incorporados nos REMUS 100, bem como nos navios e helicópteros de caça-minas e NCMM equipados com ROVs assumiam a tarefa de identificar, localizar e plotar esses alvos com precisão. Em seguida, equipes especializadas em DAE, ou ROVs apropriados, como o *SeaFox*, eram mobilizados para destruir ou neutralizar esses alvos de maneira segura e eficaz (DoD, 2014, tradução nossa).

Por conseguinte, para obter uma compreensão completa da escala e do sucesso das operações de CMM executadas durante a Operação *Iraqi Freedom*, foi possível detectar, classificar e identificar cerca de 500 artefatos submersos. Destes, aproximadamente 90 foram definitivamente identificados como minas marítimas de origem iraquiana, sendo então destruídas e neutralizadas. Portanto, os resultados práticos obtidos através da utilização do VSA REMUS 100 em CMM durante esse significativo conflito internacional, confirmaram a efetividade dos UUVs nessa vertente militar (Rios, 2005, tradução nossa).

## **2.4 A Integração de UUVs à MB**

Segundo Agarwala (2021, tradução nossa), as marinhas de todo mundo sempre foram focadas em investimentos em tecnologia se comparada às outras forças. Dito isso, também é um fato que o setor naval, de modo geral, ficou para trás na adoção de tecnologias inovadoras

em relação a outras vertentes do meio militar. Essa relutância de investimentos deve-se principalmente ao fato de a indústria ser avessa aos riscos e ser impulsionada principalmente pela pressão dos órgãos reguladores, requisitos comerciais, a obsolescência das tecnologias existentes e/ou a incapacidade de lidar com as crescentes exigências tanto no mar quanto no porto.

Vale ressaltar que um dos maiores desafios à integração desses veículos e outras tecnologias avançadas na MB é o orçamento anual do Ministério da Defesa. De acordo com o Relatório Setorial da Defesa de 2023, o orçamento alocado para a área de Defesa totaliza R\$ 124,4 bilhões, com cerca de 80% desse montante destinado às despesas com o setor de pessoal. Desta forma, com essa distribuição de recursos, resta uma margem limitada para investimentos em tecnologia e inovação, aproximadamente 10% (Brasil, 2022c).

Nesta sessão será discutida a aquisição e integração do VSA REMUS 100 à MB, além de retratar sobre o desenvolvimento do AUV feito pelo IPqM. Por último, será feita uma análise do lançamento desses UUVs a partir das FCT.

#### 2.4.1 O VSA *REMUS 100* na MB

A MB, por intermédio da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), assinou em 2015 um convênio com a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e a Fundação de Estudos do Mar (FEMAR), tendo o Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) como executor interveniente. O objetivo desse convênio foi a aquisição do REMUS 100, veículo mencionado anteriormente neste trabalho pela eficiente operacionalidade nas CMM da Operação *Iraqi Freedom* (Souza, 2015).

Esse veículo foi recebido pela DHN no início de 2016 e, posteriormente, foi necessário treinamento militar para sua operação. Adquirido inicialmente em função do Projeto de Aquisição do Navio Polar “Almirante Maximiano”, para ser utilizado para realizar coleta de dados hidroceanográficos, monitoramento de canal de navegação, inspeção de estruturas submersas, como cascos soçobrados e outros perigos à navegação, estudos de caracterização de sedimentos do solo marinho, obtido a partir da análise da intensidade do sinal acústico de retrospalhamento, entre outras aplicações.

Porém, logo foi constatada a limitação do AUV para produção cartográfica, devido ao significativo desvio padrão apresentado por seus sensores quando comparados aos ecobatímetros tradicionais. Essa restrição na capacidade do VSA, não inibiu a MB de considerar a utilização do REMUS 100 em atividades de CMM. Em relação à operação desses veículos

em CMM experimentais pela MB, são majoritariamente reservados, no entanto, vale a pena mencionar os testes operacionais realizados durante a Comissão Dragão 2017, no Canal de Itaguaí, nos quais o NV “Atalaia” desempenhou o papel de plataforma lançadora.

#### 2.4.2 O Desenvolvimento do AUV Brasileiro

Em setembro de 2014, no decorrer do III Simpósio de Ciência e Tecnologia e Inovação da Marinha, diversos temas foram discutidos, incluindo a perspectiva da MB, em conjunto com outras instituições de ensino nacional e a indústria, conduzirem o desenvolvimento de projetos de tecnologia relacionados aos VSAs. Esta iniciativa foi concretizada por meio da formalização de um Termo de Compromisso entre o IPqM e empresas nacionais para avançar no desenvolvimento desses veículos (Padilha, 2015).

Inicialmente o projeto de AUV desenvolvido pela MB avançou a esteira do Projeto Pirajuba, da Universidade de São Paulo (USP), e o Projeto Jaú II da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC). Posteriormente, o IPqM se viu na necessidade de projetar um AUV com maiores funcionalidades, a partir de manufatura aditiva de baixo custo, espelhando-se no VSA americano REMUS 100 (Mendonça; Teles; Mendes, 2020).

Esse projeto financiado pela FINEP, tem como cliente o ComForMinVar, e ainda se encontra nas fases iniciais. A previsão para sua conclusão é em 2028, com um custo aproximado de R\$ 8 milhões. Esse veículo ainda não foi nomeado, mas seu emprego será em operações de caça-minas. Abaixo, seguem algumas características e capacidades desse AUV, relacionadas pelo IPqM:

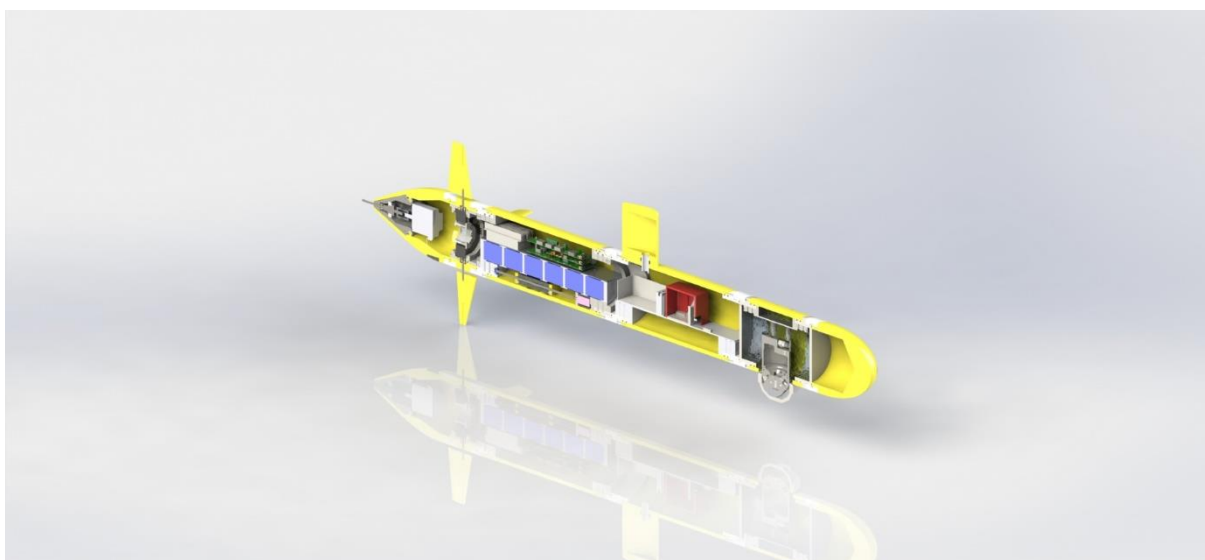
- Produção de imagens sintéticas e/ou reais, que possibilitam a localização de objetos submersos
- Navegação por trajetórias pré-programadas até objetos de interesse
- Filmagem do leito marinho para identificação de objetos
- Armazenamento de dados no próprio veículo, para posterior processamento
- Emprego em áreas marítimas de interesse, dentro da AA, como plataformas de petróleo e gás, entradas e saídas de portos e bases militares e demais áreas focais
- Opera em missões de esclarecimento e climático-ambientais
- Opera em uma profundidade máxima de 50 metros
- Lançado a partir de navios de superfície ou terra, em ambos com alcance de até 5 milhas náuticas



- Veículo com comprimento e largura inferiores à 5,9 e 5,7 metros respectivamente
- Opera até o nível 5 da Escala Douglas<sup>52</sup>
- Opera até o nível 5 da Escala Beaufort<sup>53</sup>
- Opera em ambientes marítimos com correntes de até 2 nós
- Pode ser lançado por guindaste
- Guiamento de forma autônoma, ou teleoperada quando à superfície
- Autonomia de pelo menos 3 horas de operação
- Atingi velocidade de deslocamento de pelo menos 3 nós
- Composto por casco de material não magnético

Na Figura 27, é apresentado o projeto do futuro AUV brasileiro.

Figura 26- Ilustração do AUV brasileiro projetado pelo IPqM.



Fonte: Costa (2023).

A partir da conclusão do projeto, esse AUV nacional será incorporado à força naval juntamente com o REMUS 100, ampliando a capacidade de efetuar CMM. Isso possibilitará a caça de minas por todos os Distritos Navais (DN), uma vez que não ficaria restrito aos NVs sediados em Salvador. Assim, ampliando os vetores capazes de efetuar CMM, além de reduzir exponencialmente o tempo de mobilização dos meios e de resposta a uma ameaça inimiga, onde quer que seja no vasto território brasileiro.

---

<sup>52</sup> Escala Douglas – Escala criada em 1917 pelo então Capitão inglês Henry Percy Douglas, classificando os diferentes estados do mar com base no tamanho das ondas (Brasil, [2018?]).

<sup>53</sup> Escala Beaufort – Descrita em 1806, pelo Contra-Almirante britânico Francis Beaufort. Empregada para descrever as condições de vento (Brasil, [s.d.]).

### 2.4.3 Lançamento dos UUVs a partir da FCT

Com a conclusão da construção das FCT, haverá a possibilidade de efetuar CMM com UUVs utilizando a própria fragata como plataforma de lançamento, a partir de sua rampa de popa. O projeto da FCT é baseado na fragata leve *MEKO A-100*, desenvolvida pelo grupo *Thyssenkrupp*, que se destaca por sua capacidade de prover modularidade de missões. O navio carregará em sua estrutura o *MEKO Flex Deck*<sup>54</sup>, que permite que o convoo seja retrátil, possibilitando o alojamento de até 6 contêineres. Isso viabilizará missões modulares de CMM com UUVs, incluindo a possibilidade de integrar o sistema *Integrated Mine Countermeasures System*<sup>55</sup> (IMCMS) da empresa *Atlas Elektronik*. Dessa forma, a modularidade oferecida pela FCT, Figura 27, permitirá ao moderno meio da esquadra atuar como um NCM.

Figura 27 - Modularidade da FCT.



Fonte: Padilha (2018).

<sup>54</sup> *MEKO Flex Deck* – Configuração que permite a montagem de módulos de missão, que fornecem multiplicação de força flexível e a configuração com rampa de popa (Thyssenkrupp, [2023?], tradução nossa).

<sup>55</sup> *Integrated Mine Countermeasures System* – Sistema Integrado de Contramedidas de Minagem, tradução nossa.

A perspectiva de usar a FCT como plataforma para operações de CMM com UUVs representa uma evolução significativa em termos de capacidades navais, aproveitando ao máximo a flexibilidade e adaptabilidade proporcionadas pela fragata da família *MEKO A-100*, *MEKO A-200* e *MEKO A-300*. Isso demonstra o compromisso da MB em empregar tecnologias avançadas para fins estratégicos.

### **3 METODOLOGIA**

Trata-se de uma pesquisa de objetivo descritivo, exploratório, em uma abordagem quali-quantitativa, pois tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema em questão, com a finalidade de torná-lo mais explícito e construir hipóteses, além de a partir da simulação apresentar resultados numéricos. Para tal, utilizou-se o método de pesquisa hipotético-dedutivo. O procedimento adotado foi bibliográfico, documental em todo seu escopo e especificamente quanto a simulação, estudo de caso (Gil, 2002).

#### **3.1 Classificação da Pesquisa**

Dentre os métodos de classificação de pesquisas apresentados por Gerhardt e Silveira (2009) e Gil (2002), é possível classificar esse trabalho como:

##### **3.1.1 Quanto aos fins**

Segundo Gil (2002), pode-se afirmar que as pesquisas científicas como descritiva e exploratórias visam o aprimoramento de ideias já exploradas e publicadas ou a descoberta de intuições. Conforme Gerhardt e Silveira (2009), uma coleta de informações descritivas e exploratórias podem ser realizadas por meio de entrevistas, busca de informações e dados em bancos de dados, além de documentos e a partir de observações. Desta forma, o pesquisador poderá, por meio da leitura e coleta de informações, evidenciar a perspectiva que lhe parece mais pertinente para abordar seu objeto de estudo, possibilitando, conseqüentemente, estruturar ideias, permitindo comparações e análises para eventual formulação de soluções para abordar o problema tratado.

##### **3.1.2 Quanto aos meios**

De acordo com Gerhardt e Silveira (2009), uma técnica para análise de dados quali-quantitativa permite ao pesquisador a avaliação correta, compreensão e interpretação dos dados obtidos, tornando possível tratar essas informações a fim de concluir seu objeto de estudo. Para que a técnica seja eficaz, é necessário que o pesquisador considere que muitas vezes os dados apresentados de um estudo detalhado, visto que trazem consigo significados que os atores sociais apresentam na vivência de sua realidade. Nesse sentido, a análise de conteúdo se coloca

como uma metodologia capaz de detectar, através de procedimentos sistemáticos, indicadores que permitem a inferência de conhecimentos relativos às condições de produção da mensagem a ser transmitida.

Além disso, a análise do discurso também é uma metodologia necessária, uma vez que promove uma reflexão ao pesquisador sobre as condições de produção, compreensão e significado dos textos produzidos nos mais diversos campos. Não obstante, faz-se mister a correta apreciação de algumas fases da pesquisa consideradas essenciais, como a exploração do material, a organização, o tratamento de dados e dos resultados (Gerhardt e Silveira, 2009).

### **3.2 Limitações do Método**

Segundo Gasque (2007), como em toda metodologia, existem características específicas do método exploratório e quali-quantitativo. Pode-se citar como exemplo a subjetividade da informação, ocasionada pela maximização das visões trazidas pelo autor, bem como pela capacidade de percepção crítica do próprio pesquisador pela sua tendência pessoal. Não obstante, o extenso volume de informações disponíveis traz complexidade e exige um alto grau de seleção do pesquisador para concentrar recursos na solução do objeto de interesse. Por último, pode-se elencar a sensibilidade na análise dos resultados, uma vez que o pesquisador, ao apontar uma solução particular, talvez por não generalizar para outras realidades.

Quanto a simulação, as limitações do método serão mostradas, e ficarão mais evidentes, à medida que o estudo experimental seja descrito. Entretanto, algumas podem ser elencadas:

- Acionamento da mina acústica através da comparação da assinatura acústica – em banda larga e em banda estreita;
- Aproximação do Ruído Irrradiado do NV a navio similar, em dimensão e tipo de propulsão, disponível em banco de dados aberto do XIV Desafio ETAS da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) 2023;
- Confiabilidade dos dados de ruído irradiado de embarcações e AUV disponíveis em fonte aberta. Estes dados não fornecem parâmetros importantes como: sensibilidade dos hidrofones e ganho de pré-amplificadores;
- Influência do campo próximo no ruído irradiado medido do AUV;
- Simplificação dos dados climatológicos do modelo de propagação acústica por traçado de raios (TRACEO), e desconsiderações dos movimentos geotróficos e de correntes de marés;

- Características da fonte e receptor, inseridas no TRACEO, estacionárias – não mudam com o tempo;
- Foram desconsideradas as propriedades de cisalhamento da água; e
- Não foram levados em conta a imprecisão do modelo.

Portanto, além do exposto, a maior limitação advém da complexidade em concatenar soluções das aplicações da GM e das operações de CMM.

### **3.3 Universo de Amostragem**

Segundo Gasque (2007), uma amostragem fornece uma orientação constante ao pesquisador para direcionar o processo de coleta, organização e interpretação dos dados, com o objetivo de oferecer sustentação teórica.

Para a execução da pesquisa, foi realizada uma seleção criteriosa de trabalhos de diferentes setores da sociedade que puderam contribuir para os desenvolvimentos necessários ao objeto de estudo. Assim, elencar-se como primordiais tanto os artigos de caráter militar, a respeito das especificidades da GM, no Brasil e no mundo, quanto as teses, artigos científicos e dissertações, de caráter profundamente técnico, que permitiram a compreensão do princípio de funcionamento da tecnologia, suas aplicações e suas características não que tange o quesito segurança, bem como o concatenamento geral de ideias para a conquista de uma proposição fina.

O experimento, embora simulado, utiliza sinais disponíveis em banco de sinais acústicos disponíveis na internet. Com a vantagem de poder controlar as variáveis envolvidas no experimento, a simulação mostra-se eficiente em uma análise preliminar da comparação entre ganhos tático/operacionais dos meios - NV e AUV REMUS 100.

### **3.4 Coleta e Tratamento de Dados**

De acordo com Gerhardt e Silveira (2009), na coleta de dados, o importante não é somente coletar informações relacionadas aos conceitos, mas também obter informações de forma que se possa aplicar o tratamento necessário para testar as hipóteses. É importante destacar que em uma pesquisa científica, o objetivo é responder à questão inicial. Portanto, é necessário elaborar hipóteses e verificar posteriormente se os dados encontrados, após serem analisados empiricamente, específicos aos resultados esperados.

Quanto a simulação:

Os dados coletados foram extraídos do repositório Dosits (2023, tradução nossa) e do banco de dados do PMPAS-BS, utilizado durante o XIV Desafio ETAS.

A análise preliminar dos ruídos – cortes, espectrogramas, tamanho de janelas, tipo de escalas – utilizou o *Software Audacity*. Ao final desta pré-análise, obteve-se o áudio, em *.wav*<sup>56</sup>, do ruído que foi utilizado no experimento.

---

<sup>56</sup> *.Wav* – Extensão/ formato para salvar arquivos de áudio.

## 4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE ACÚSTICA COMPARATIVA ENTRE AUV REMUS 100 E NV GENÉRICO

Nesse capítulo será exposto um experimento acústico e, posteriormente será apresentada a análise qualitativa e quantitativa dos resultados desse experimento.

### 4.1 Descrição

As minas acústicas são acionadas pela comparação da assinatura acústica pré-determinada, a partir de uma banda de frequência de interesse ou em um tom característico (banda estreita de frequência). O acionamento pela comparação divide o espectro em bandas de 1/3 de oitava e compara os níveis de densidade de potência espectral *Power Spectral Density*<sup>57</sup>(PSD) em cada uma dessas bandas. Na faixa da banda de frequência, a partir dos limites superiores e inferiores, compara-se o PSD nesta banda larga de frequência, que normalmente fica entre 300-500 Hz. Por outro lado, o acionamento através do tom característico aciona-se a partir da comparação de frequências, em banda estreita, entre 10-20 Hz.

O estudo em questão, concentra-se na análise a partir do ruído acústico submarino de dois meios – NV e AUV REMUS 100. Pretende-se efetuar uma comparação da distância segura, teoricamente estabelecida, para evitar a ativação de minas acústicas, baseando-se em três abordagens distintas. De forma a enunciar as comparações a partir:

1. da assinatura acústica pré-determinada e bem definida;
2. da banda larga, entre 300-500 Hz de largura; e
3. da banda estreita, entre 10-20 Hz.

A primeira etapa do estudo consiste na caracterização da mina e dos meios a serem empregados a partir de suas assinaturas acústicas. No caso dos navios, e, do ruído de interesse, no caso da mina. Para tal, toma-se a assinatura acústica em 1/3 de oitava - análise em banda larga, e – *Detection of Envelope Modulation on Noise*<sup>58</sup> (DEMON) -, que é a análise em banda estreita, com tons bem definidos do ruído de cavitação. A Figura 28 apresenta a assinatura acústica em 1/3 de oitava e a Figura 29 mostra a análise DEMON.

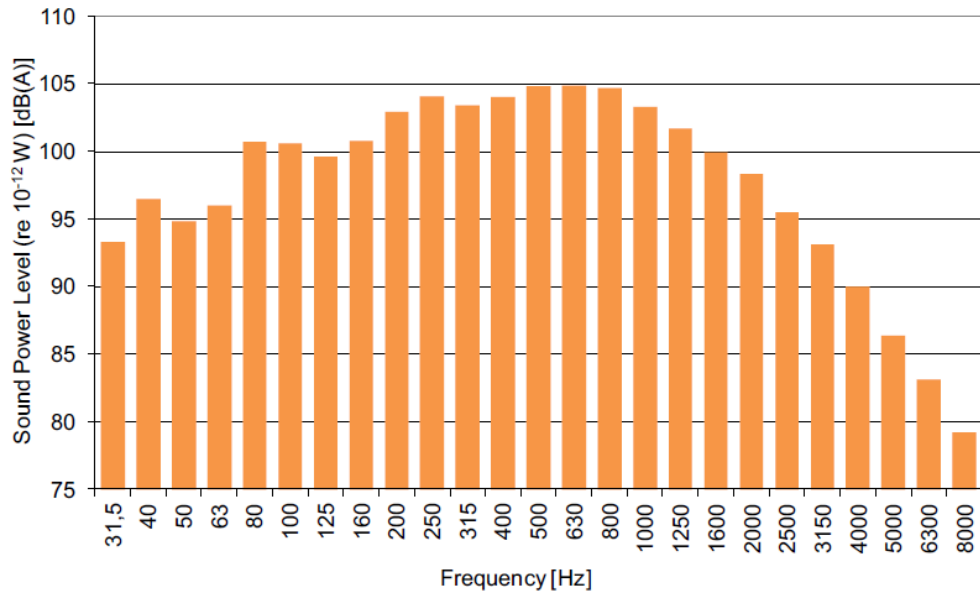
---

<sup>57</sup> *Power Spectral Density* – Densidade Espectral de Potência, tradução nossa.

<sup>58</sup> *Detection of Envelope Modulation on Noise* – Detecção de Modulação de Envelope em Ruído, tradução nossa.

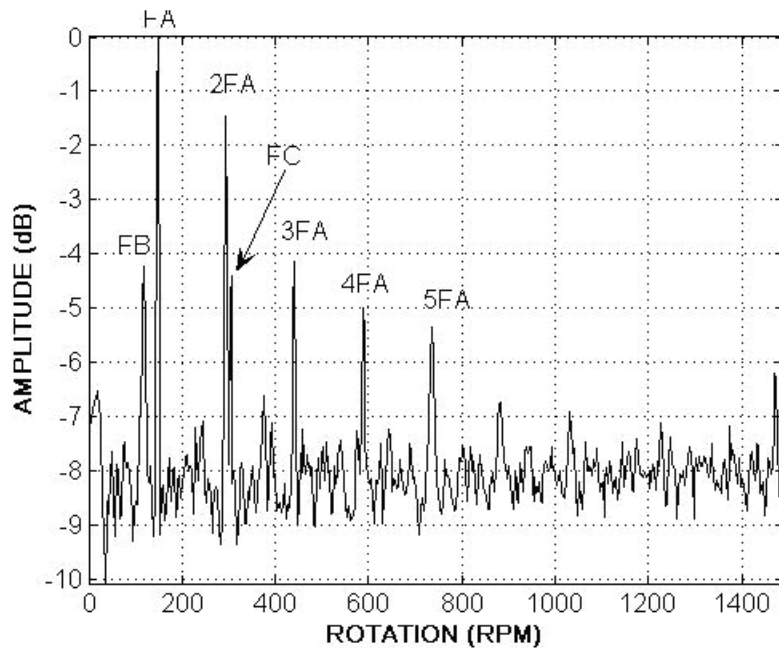


Figura 28 – Análise em Banda Larga – 1/3 de oitava.



Fonte: Di Bella e Remigi (2013).

Figura 29 – Análise em Banda Estreita - DEMON.



Fonte: De Moura (2013).

Em seguida, para comparar o nível de PSD de acionamento da mina com os navios, utilizar-se-á o ruído ambiente local e, a partir dele, estimar a *base-level*. *Base-level* é similar a estipularmos um nível basal, a partir do qual, o ruído acústico submarino do NV/AUV seria encoberto pelo ruído submarino ambiente, ou seja,  $SNR = 0$  dB.

Na próxima etapa, estipular-se-á a distância segura para o não acionamento da mina e avaliar-se-á, também, o “*Source Level*” (SL) que sobressairá ao *base-level*, em dB. Para tal, utilizar-se-á um modelo de propagação acústica por traçado de raios para determinar a que distância a *Transmission Loss* (TL) será alcançada (Rodriguez, 2010, tradução nossa).

#### 4.1.1 Caracterização acústica

Ao ser medido o ruído irradiado de um navio, existem 3 principais componentes que se combinam na resultante do ruído submarino de cada navio: cavitação, máquinas e arrasto hidrodinâmico (Hodges, 2011, tradução nossa). A citar:

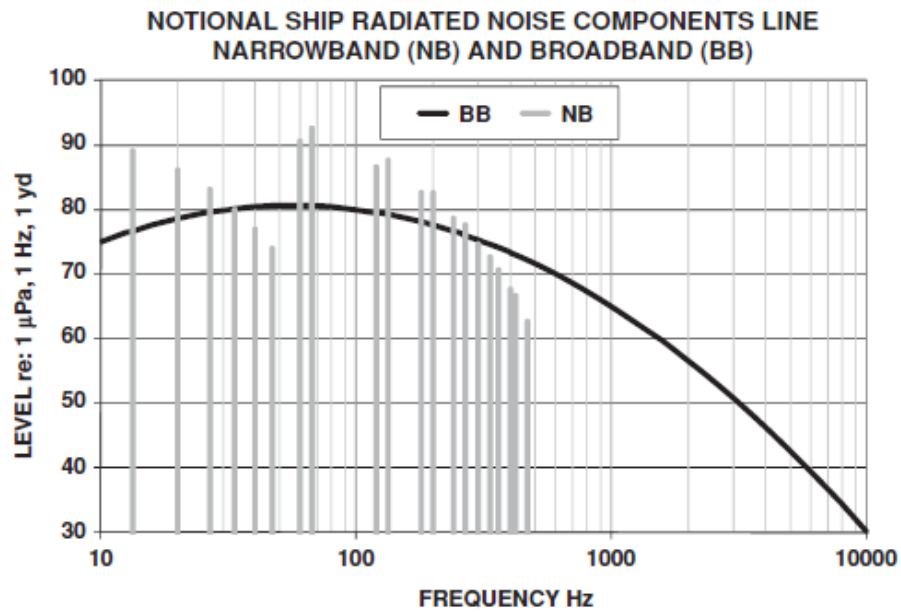
- Cavitação ocorre quando as velocidades do fluxo nas pás do hélice tornam-se grandes o suficiente para as forças de Bernoulli e a pressão local seja negativa, excedendo a tensão superficial da água. A mudança na pressão da água origina o colapso de bolhas, forma vapor de água e ar;
- Ruído de maquinaria é o ruído gerado por todas as partes móveis do navio. As vibrações são originadas pela combustão dos motores diesel, eixos, sistemas auxiliares de geração de energia, bombas de esgoto e incêndios, ventilação e por todos os equipamentos possam gerar vibrar e transferi-las para o navio; e
- Ruído hidrodinâmico é o ruído gerado pela flutuação e irregularidades no fluxo de fluido sobre a estrutura. A turbulência cria um campo de pressão e não um campo acústico. Apesar de não ser abordado nesse trabalho, o ruído do fluxo é um fenômeno de campo próximo, que decresce muito rapidamente com a distância.

Essas três componentes podem ser identificadas a partir de duas principais análises: banda estreita e banda larga (De Moura, 2013).

A análise de banda estreita leva em consideração o Espectro de Welch, onde a resolução em frequência do sinal analisado é maior do que se comparado com a banda larga. Com isso, em banda estreita, é possível observar-se os tons característico do navio analisado determinar o Nível de Pressão da Fonte, SL.

A análise de banda larga leva em consideração o Espectro em 1/3 de oitava (Ansi, 2009, tradução nossa) e faz a soma da PSD, dentro das bandas estipuladas pela Norma ANSI, e divide pelo tamanho da banda. Sendo assim, tons discretos do sinal analisado são “encobertos” pela média do PSD dentro da banda. A Figura 30 mostra a diferença entre a análise de banda estreita (“*narrow band*”) e a análise de banda larga (“*broad band*”). A partir desses dois tipos de análise é que são caracterizados os ruídos: banda larga e banda estreita (Hodges, 2011, tradução nossa).

Figura 30 – Comparação entre ruído de banda larga (BB) e ruído de banda estreita (NB).



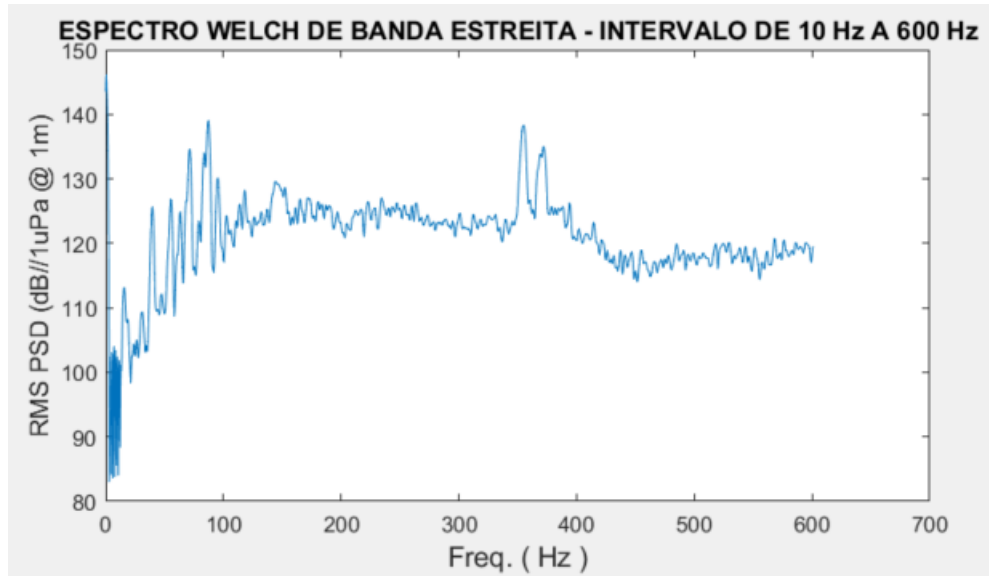
Fonte: Hodges (2011).

A banda de interesse para medição de ruído submarino irradiado de navios varia entre 10 e 500 HZ (Hodges, 2011, tradução nossa).

#### 4.1.2 NV

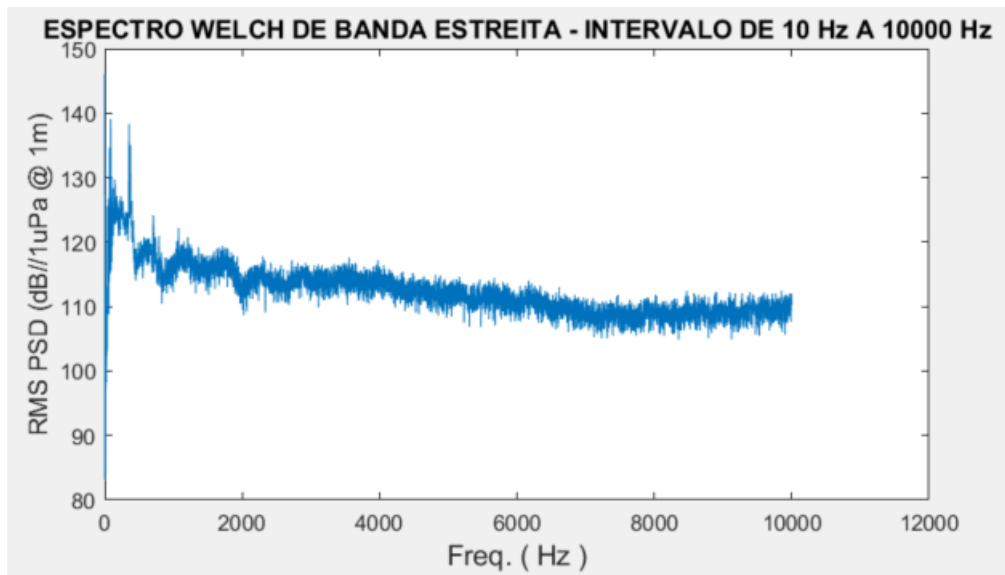
O NV pode ser caracterizado acusticamente em banda larga e banda estreita como:

Figura 31 – Espectro de Welch, 10 - 600 Hz, de NV.



Fonte: *Matlab* (2023).

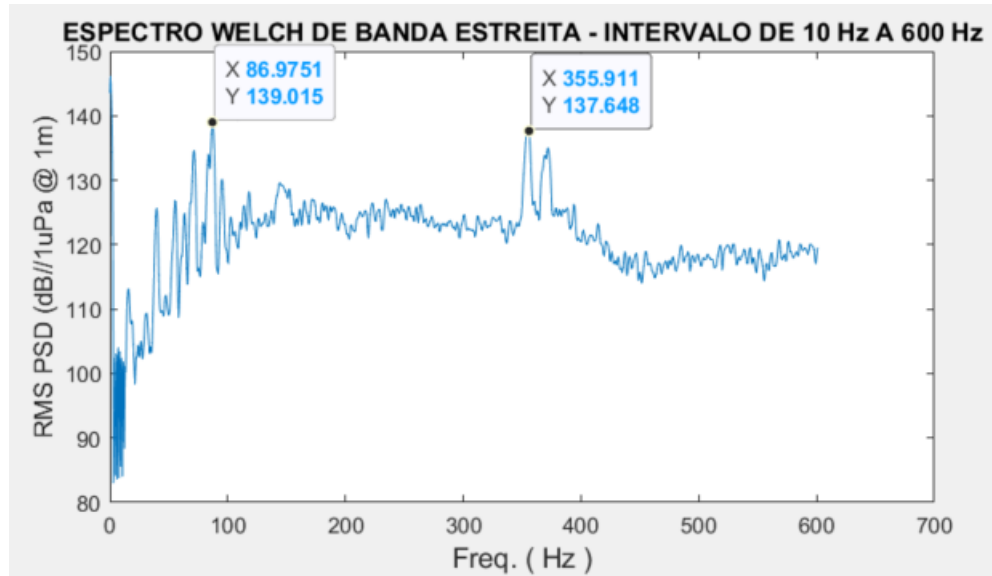
Figura 32 – Espectro de Welch, 10 – 10.000 Hz, de NV.



Fonte: *Matlab* (2023).

Nas figuras 31 e 32, o Espectro de Welch de 10-600 Hz e 10-10.000 Hz de banda estreita, respectivamente, observa-se 2 tons preponderantes na caracterização acústica da embarcação. O primeiro é o ruído de cavitação e o segundo é da maquinaria do navio. Pela Figura 32, pode-se observar que estes dois tons são os de maior PSD [dB] ao longo de todo o espectro de interesse em que as embarcações irradiam (Urick e Kuperman, 1989, tradução nossa), e que os presentes na Figura 31 são máximos absolutos. Através da Figura 33, pode-se extrair os dois tons predominantes para o navio.

Figura 33 – Espectro de Welch, 10 – 600 Hz, tons característicos de NV.



Fonte: *Matlab* (2023).

Sendo assim, caracteriza-se, em banda estreita, o navio por estes 2 tons predominantes, Tabela 7.

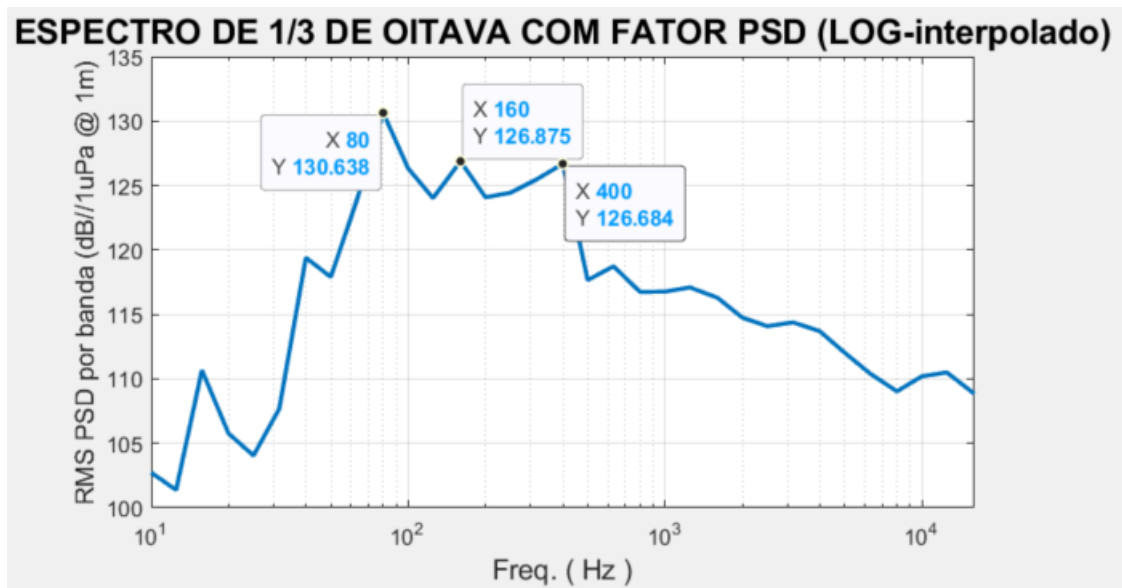
Tabela 7 – Tons característicos, em banda estreita, de NV.

<b>PSD [dB]</b>	<b>f [Hz]</b>
139,015	86,98
137,65	355,92

Fonte: Próprio autor (2023).

Ao analisar-se o NV através do espectro em 1/3 de oitava (Ansi, 2009, tradução nossa), Figura 34, pode-se concluir que as bandas de maior nível espectral de ruído são: 80, 160 e 400 Hz.

Figura 34 – Espectro em 1/3 de oitava – NV.



Fonte: *Matlab* (2023).

Dessa maneira, caracteriza-se, em banda larga, o navio por estas 3 bandas – em 1/3 de oitava - predominantes, Tabela 8:

Tabela 8 – Bandas características, em Banda Larga, de NV.

PSD [dB]	f [Hz]
130,64	80,00
126,88	160,00
126,69	400,00

Fonte: Próprio autor (2023).

De maneira resumida, o NV pode ser caracterizado, Tabela 9:

Tabela 9 - Caracterização acústica - em banda larga e estreita - de NV.

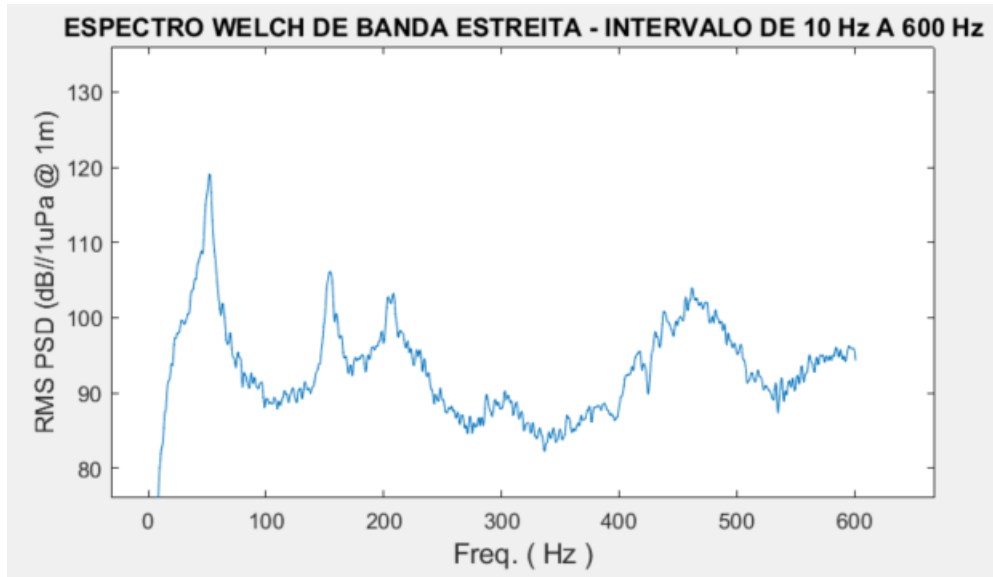
Banda Estreita (Espectro Welch)		Banda Larga (1/3 de oitava)	
PSD [dB]	f [Hz]	PSD [dB]	f [Hz]
139,015	86,98	130,64	80,00
137,65	355,92	126,88	160,00
		126,69	400,00

Fonte: Próprio autor (2023).

### 4.1.3 AUV

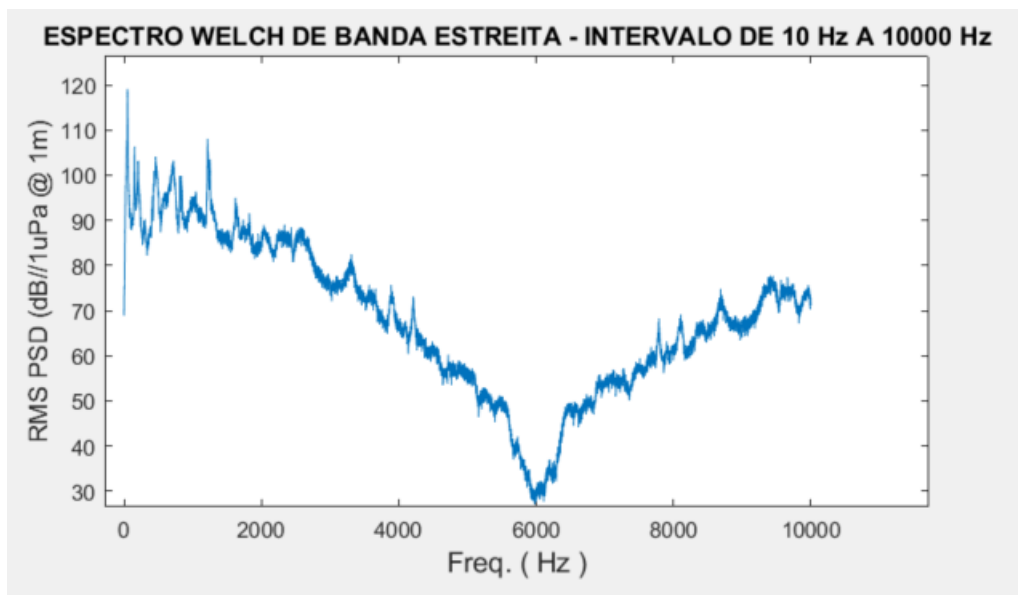
O AUV REMUS 100 pode ser caracterizado acusticamente – em banda estreita e banda larga - como Espectro Welch e 1/3 de oitava, respectivamente:

Figura 35 - Espectro de Welch, 10 - 600 Hz, de AUV – tipo REMUS 100.



Fonte: *Matlab* (2023).

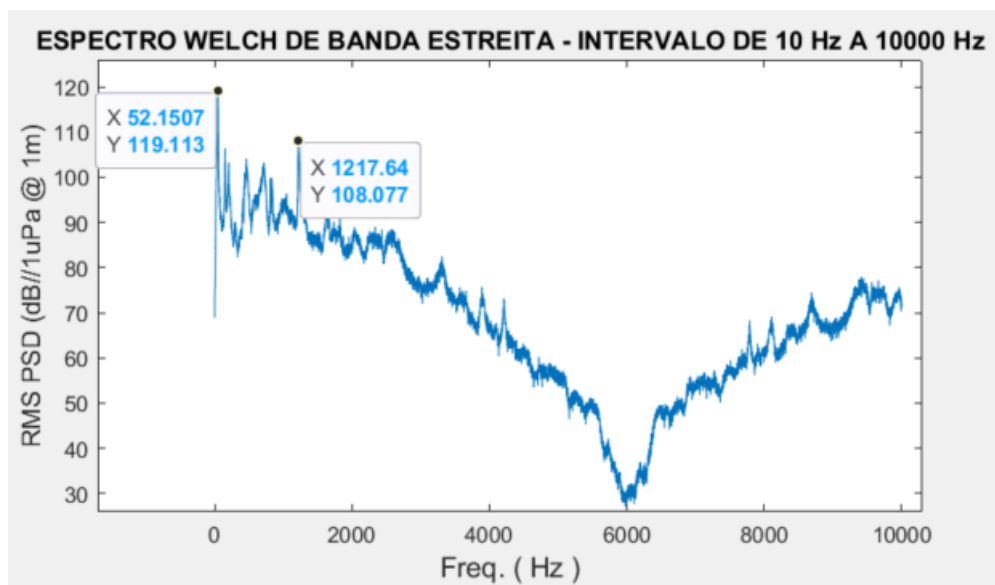
Figura 36 - Espectro de Welch, 10 – 10.000 Hz, de AUV – tipo REMUS 100.



Fonte: *Matlab* (2023).

Ao se observar as Figuras 35 e 36, espectro de Welch de 10-600 Hz e 10-10.000 Hz de banda estreita, respectivamente, nota-se 4 tons preponderantes na caracterização acústica do AUV. O primeiro é o ruído de cavitação e seus harmônicos e, próximo dos 1000 Hz, está o ruído do motor do AUV, que usualmente é um motor elétrico DC *brushless*. Através da Figura 36, pode-se extrair os dois tons predominantes para o AUV. Outro ponto que cabe ressaltar é, que dado as particularidades em que o ruído irradiado do AUV foi coletado e, que são desconhecidos parâmetros de aquisição – sensibilidade do hidrofone, ganho dos amplificadores – sabe-se, porém a que distância o ruído acústico submarino do REMUS 100 foi medido. Sendo assim, o principal indício para que se tenha a evidente atenuação, mostrada na Figura 37 – próximo aos 6 KHz - é a influência do campo próximo, que se evidencia com notáveis variações do nível espectral para pequenas alterações de distâncias.

Figura 37 - Espectro de Welch, 10 -10.000 Hz, tons característicos de AUV – tipo REMUS 100.



Fonte: Matlab (2023).

Sendo assim, através da Figura 37, caracteriza-se, em banda estreita, o AUV – tipo REMUS 100 -, por estes 2 tons predominantes, Tabela 10.

Tabela 10 - Tons característicos, em banda estreita, de AUV – tipo REMUS 100.

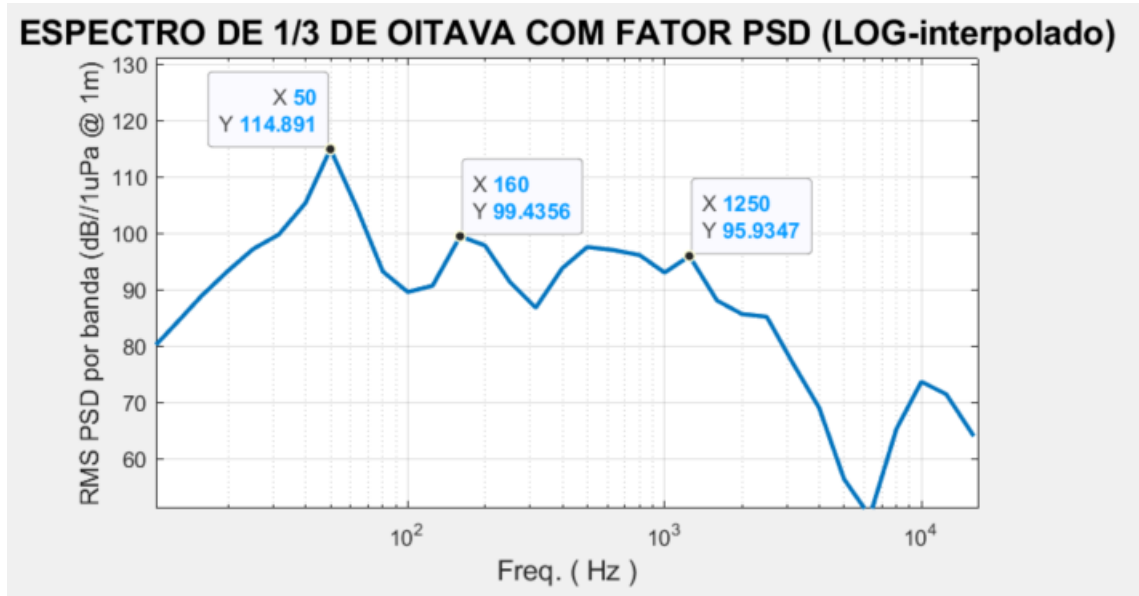
PSD [dB]	f [Hz]
119,11	52,15
108,08	1217,64

Fonte: Próprio autor (2023).



Analisa-se que o AUV no domínio da frequência, através do espectro em 1/3 de oitava (Ansi, 2009, tradução nossa), pode-se concluir que as bandas de maior nível espectral de ruído são: 50, 160 e 1250 Hz.

Figura 38 - Espectro em 1/3 de oitava – AUV.



Fonte: *Matlab* (2023).

Sendo assim, com auxílio da Figura 38, caracteriza-se, em banda larga, o AUV por estas 3 bandas predominantes, Tabela 11.

Tabela 11 - Bandas características, em banda larga, do AUV REMUS 100.

<b>PSD [dB]</b>	<b>f [Hz]</b>
114,89	50,00
99,44	160,00
95,93	1250,00

Fonte: Próprio autor (2023).

De maneira resumida o AUV REMUS100 - pode ser caracterizado, Tabela 12.

Tabela 12 - Caracterização acústica em banda larga e estreita - de AUV.

Banda Estreita (Espectro Welch)		Banda Larga (1/3 de oitava)	
PSD [dB]	f [Hz]	PSD [dB]	f [Hz]
119,11	52,15	114,89	50,00
108,08	1217,64	99,44	160,00
		95,93	1250,00

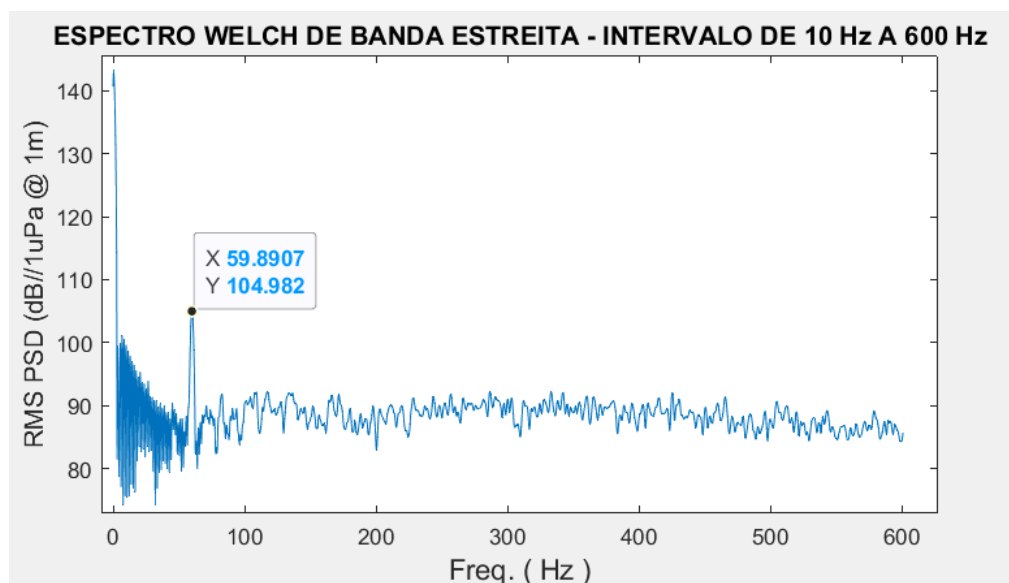
Fonte: Próprio autor (2023).

#### 4.1.4 Ruído ambiente

O ruído ambiente medido é o ruído de fundo, *background*, em que os dois meios – navio e AUV – operarão (Carey e Evans, 2011, tradução nossa). Os dados usados para quantificar o ruído ambiente são os do PMPAS-BC – Projeto de Monitoramento da Paisagem Acústica na Bacia de Santos (Xavier, 2021) – que instalou hidrofones nas proximidades da Baía de Guanabara.

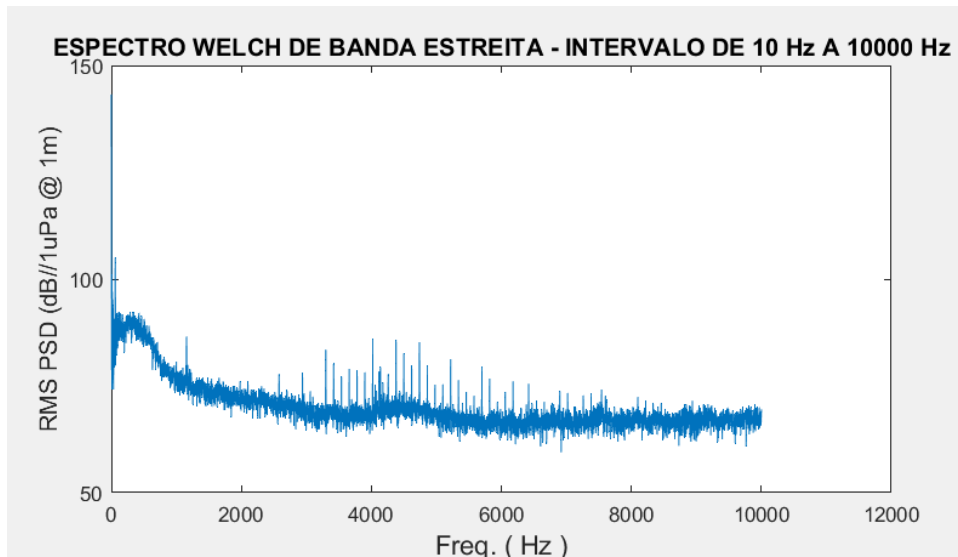
Na Figura 39 – Welch até 600 Hz -, o único ruído em banda estreita é o da rede elétrica, que adiciona a componente de 60 Hz no sinal. Na Figura 40, no espectro até 10 kHz, observa-se a inclusão de ruídos, proveniente do ruído próprio do sistema de aquisição, entre 2,5-6 kHz, entretanto, essa faixa de frequência não é onde está o sinal de interesse do navio, nem do AUV. Assim, o ruído próprio do sistema de medição não será considerado nessa comparação. O comportamento aleatório de 0 – 20 Hz acontece pela limitação do hidrofone.

Figura 39 - Espectro de Welch, 10 – 600 Hz, do ruído ambiente.



Fonte: Matlab (2023).

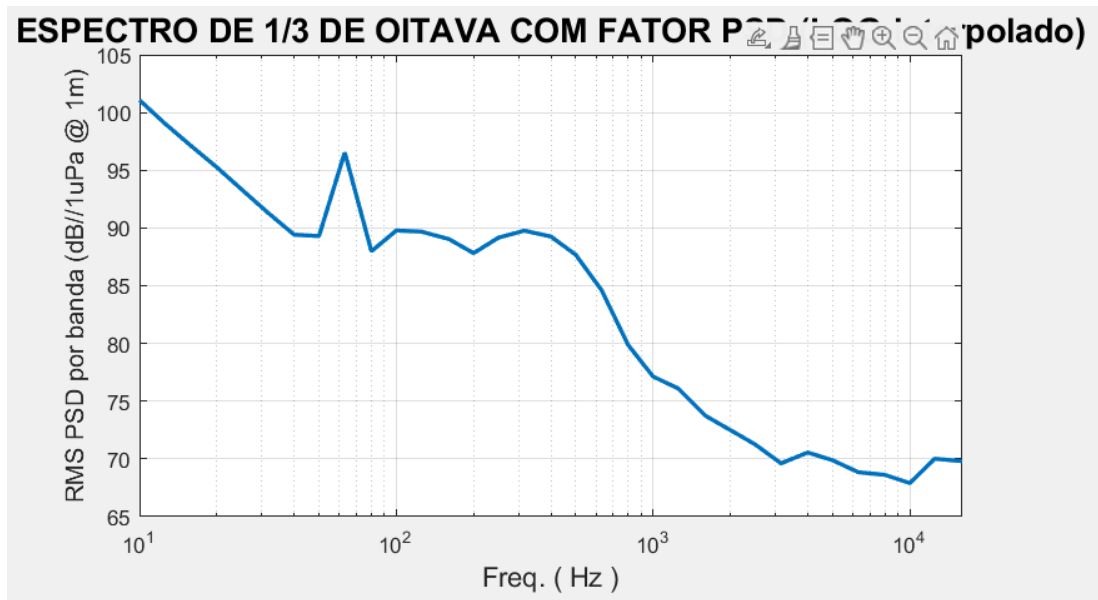
Figura 40 - Espectro de Welch, 10 – 10.000 Hz, do ruído ambiente.



Fonte: *Matlab* (2023).

Considera-se, então, *base-level noise*, para os ruídos de banda estreita, entre 10 e 500 Hz, em 90 dB.

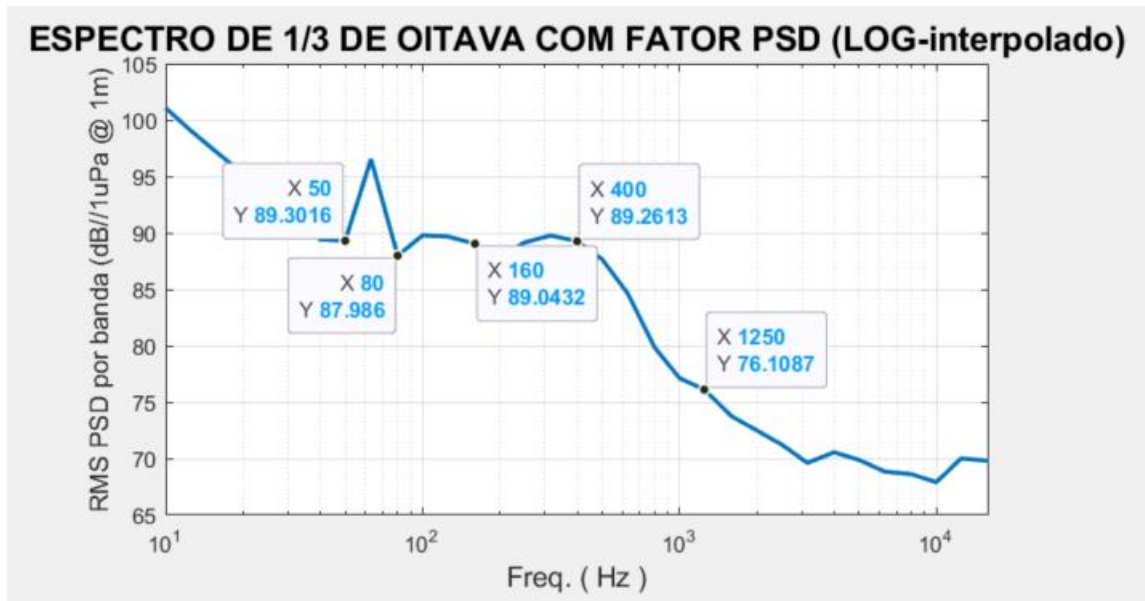
Figura 41 - Espectro em 1/3 de oitava do ruído ambiente.



Fonte: *Matlab* (2023).

A partir da Figura 41 e das Tabelas 10 e 13, pode-se determinar o *base-level* para os ruídos de banda larga nas bandas de interesse do AUV e NV – 50, 80, 160, 400 e 1250 Hz.

Figura 42 - Espectro em 1/3 de oitava do ruído ambiente e seus PSD.



Fonte: *Matlab* (2023).

Sendo assim, através das Figuras 39 e 42, o ruído de ambiente em banda estreita, 25-500Hz, e de banda larga – 50, 80 160, 400 e 1250 Hz-, pode ser caracterizado conforme a Tabela 13.

Tabela 13 – Caracterização acústica em banda larga e estreita do ruído ambiente.

Banda Estreita (Espectro Welch)		Banda Larga (1/3 de oitava)	
PSD [dB]	f [Hz]	PSD [dB]	f [Hz]
90	25 - 500	89,30	50,00
		87,99	80,00
		89,04	160,00
		89,26	400,00
		76,11	1250,00

Fonte: Próprio autor (2023).

#### 4.1.5 Propagação Acústica na Área de Interesse

A MB possui o Sistema de Previsão do Ambiente Acústico (SISPRES) (Silva; Jabor; Stadtlober, 2010), sistema de cálculo de previsão sonora a partir da caracterização ambiental. O SISPRES utiliza o TRACEO como modelo de propagação acústica por raios, e através dele pode-se avaliar a propagação acústica dos ruídos de banda larga e banda estreita na área de

interesse – mar aberto, entrada de porto, estuário, enseada. A Tabela 14 mostra os dados climatológicos inseridos no sistema, como caracterização ambiental:

Tabela 14 - Dados climatológicos inseridos na caracterização ambiental do SISPRES.

Temperatura da água do mar	Pressão atmosférica ao nível do mar
Salinidade	Umidade relativa do ar
Densidade	Vento
Velocidade do som	Precipitação
Temperatura na camada de mistura	Altura significativa de ondas
Profundidade de camada	Batimetria
Gradiente térmico na termoclina	Caracterização do fundo
Temperatura do ar	Cálculo de marés
Temperatura da superfície do mar	Nascer e pôr do sol e da lua e fases da lua

Fonte: Silva; Jabor; Stadtlober (2010).

Sendo assim, a escolha do local onde será calculada a propagação acústica e a inserção dos dados ambientais são, também, variáveis da “Equação Sonar”. Nesse trabalho, foram levadas em consideração os seguintes dados climatológicos: perfil de velocidade do som, que é função da temperatura, salinidade e pressão; batimetria; caracterização do fundo; vento; e precipitação.

O TRACEO, modelo de propagação por raios, calcula as perdas na propagação da onda acústica, *Transmission Loss* (TL). As características da fonte, NV e AUV são inseridas no modelo – SL [dB], profundidade da fonte [m], profundidade do receptor – mina acústica – [m].

Ou seja, a partir dos dados climatológicos e dados da fonte e receptor, calcula-se a atenuação, perdas na transmissão, que a onda acústica sofrerá – TL – em dB por metro. As saídas do modelo de propagação são:

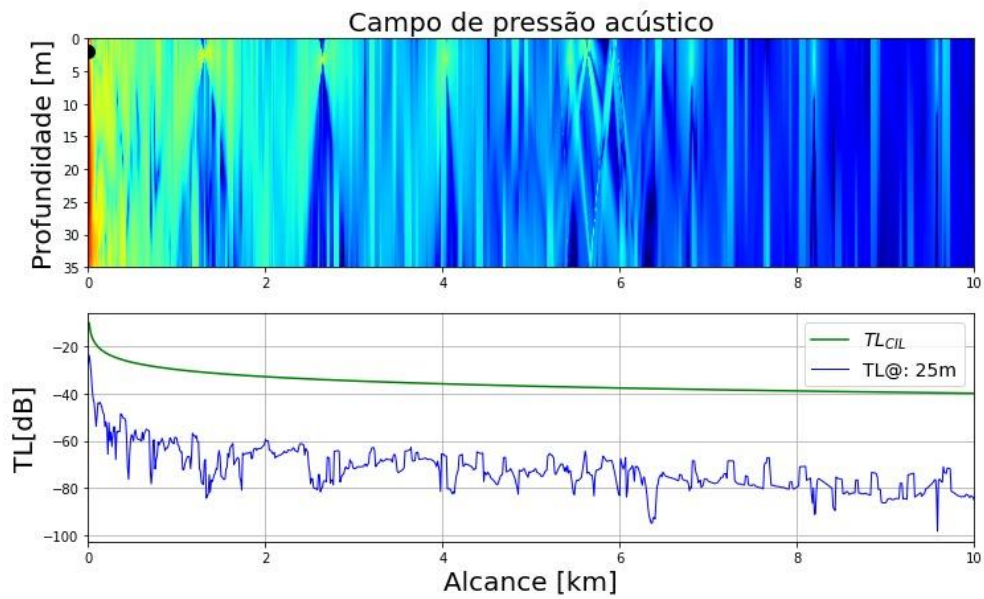
- gráfico do Campo de Pressão Acústico, em dB por km – Figura 43;
- TL@25m, em dB por km – Figura 43; e
- Alcance da perda na transmissão (TL), em dB por m – Figura 44.

As TL devem ser calculadas para que o ruído acústico submarino irradiado, pelo navio e pelo AUV, seja igual ao ruído ambiente. Nesse trabalho, levaremos em consideração apenas a relação de sinal-ruído, SNR – *Signal-Noise Ratio*-, de 0 dB, apesar de existirem minas que conseguem distinguir SNR negativos. Após a definição das TL, definir-se-ão as distâncias em que o ruído irradiado pelos meios seja igual ao ruído ambiente local. Essas distâncias serão as

“distâncias seguras de aproximação” de cada meio em relação ao acionamento da mina submarina.

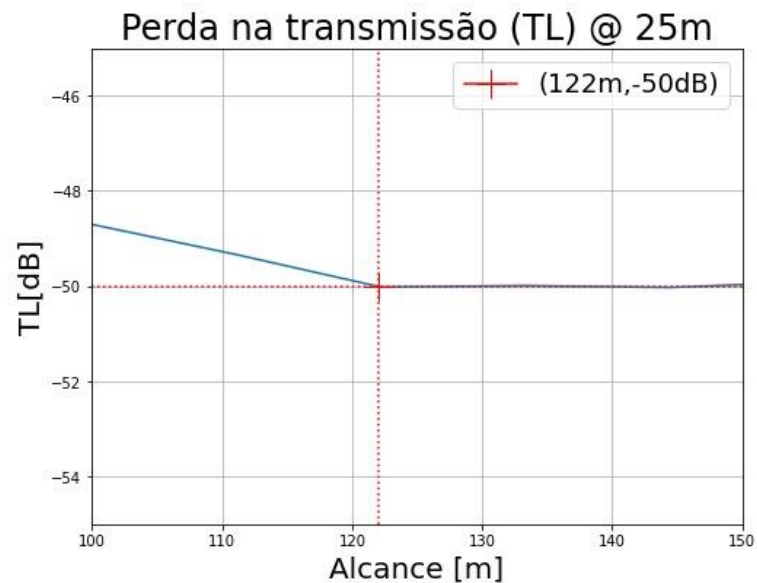
A partir das TL, dados climatológicos e dados da fonte receptor, o modelo TRACEO terá como saída as Figuras 43 e 44. A Figura 43 mostra o Campo de Pressão Acústica, em dB por km; e a Figura 44 exhibe a perda na transmissão, em dB por metro.

Figura 43 - Campo de Pressão Acústico[dB/km] e TL@25m [dB/km].



Fonte: TRACEO (2023).

Figura 44 - Alcance da perda na transmissão [dB/m].



Fonte: TRACEO (2023).

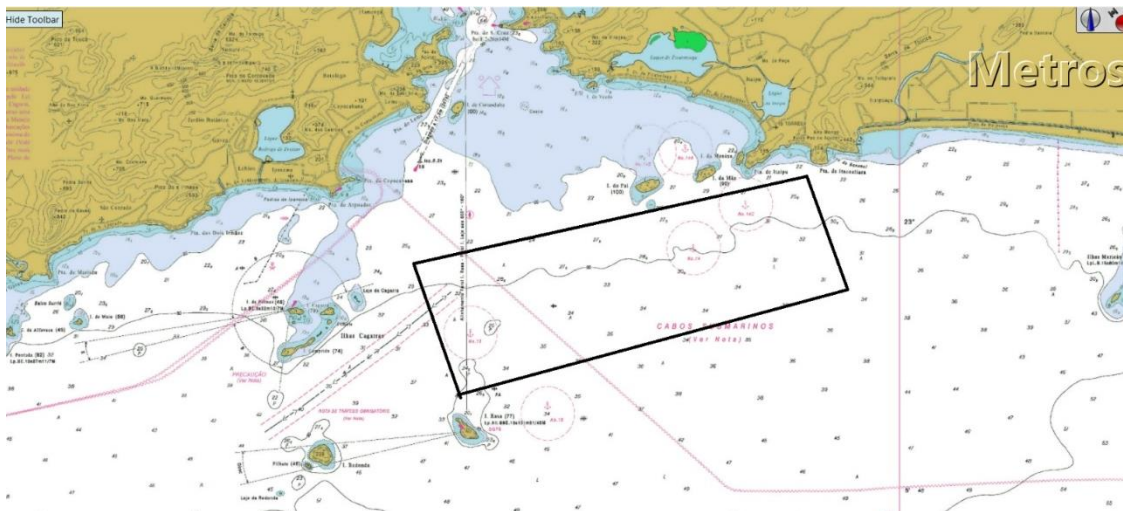
## 4.2 Resultados

A partir da descrição anterior e munido dos dados climatológicos do local, bem como do seu ruído ambiente, juntamente com a caracterização acústica dos meios, estimar-se-ão as distâncias seguras para o não acionamento da mina de influência acústica. Em seguida, comparar-se-ão as distâncias seguras de maneira qualitativa e quantitativa.

### 4.2.1 Local do experimento

A área escolhida para calcular a propagação do ruído irradiado pelo NV e o AUV REMUS 100 é a entrada da Baía de Guanabara – Figura 45. A Baía de Guanabara é área de grande interesse, sejam por questões comerciais, devido ao Porto do Rio de Janeiro, além de sediar a esquadra brasileira.

Figura 45 - Baía de Guanabara – Área utilizada para calcular a propagação acústica.



Fonte: Próprio autor (2023).

Como citado anteriormente nas limitações do experimento - condições de contorno, sobretudo das condições ambientais, foram simplificadas para:

- *Profundidade<sub>média</sub>* do local: 30m - plano;
- Perfil de velocidade do som médio anual para a área;
- Vento e precipitação zero; e
- Características da ténso: areia e lama.

#### 4.2.2 Perdas na Transmissão

Os dados a seguir, Tabelas 15 e 16, descritos no Capítulo 4.1, representam as perdas na transmissão (TL) que se deseja calcular para o NV e para o AUV, respectivamente. A TL a ser calculada representa a diferença entre o nível de ruído da fonte (SL) – NV e AUV - e o nível de ruído (SL) do ruído ambiente do local.

Dessa forma:

$$TL [dB] = SL_{ruído\ ambiente} - SL_{fonte}$$

Tabela 15 - TL a serem calculadas para o NV.

RUÍDO AMBIENTE		VARREDOR		TL [dB]	RUÍDO AMBIENTE		VARREDOR		TL [dB]
Banda Estreita (Espectro Welch)		Banda Estreita (Espectro Welch)			Banda Larga (1/3 de oitava)		Banda Larga (1/3 de oitava)		
SL [dB]	f [Hz]	SL [dB]	f [Hz]		SL [dB]	f [Hz]	SL [dB]	f [Hz]	
90	25 - 500	139,015	86,98	-49,015	87,99	80	130,64	80	-42,65
		137,65	355,92	-47,65	89,04	160	126,88	160	-37,84
					89,26	400	126,69	400	-37,43

Fonte: Próprio autor (2023).

Tabela 16 - TL a serem calculadas para o AUV.

RUÍDO AMBIENTE		AUV		TL [dB]	RUÍDO AMBIENTE		AUV		TL [dB]
Banda Estreita (Espectro Welch)		Banda Estreita (Espectro Welch)			Banda Larga (1/3 de oitava)		Banda Larga (1/3 de oitava)		
SL [dB]	f [Hz]	SL [dB]	f [Hz]		SL [dB]	f [Hz]	SL [dB]	f [Hz]	
90	25 - 500	119,11	52,15	-29,11	89,3	50	114,89	50	-25,59
		108,08	1217,64	-18,08	89,04	160	99,44	160	-10,4

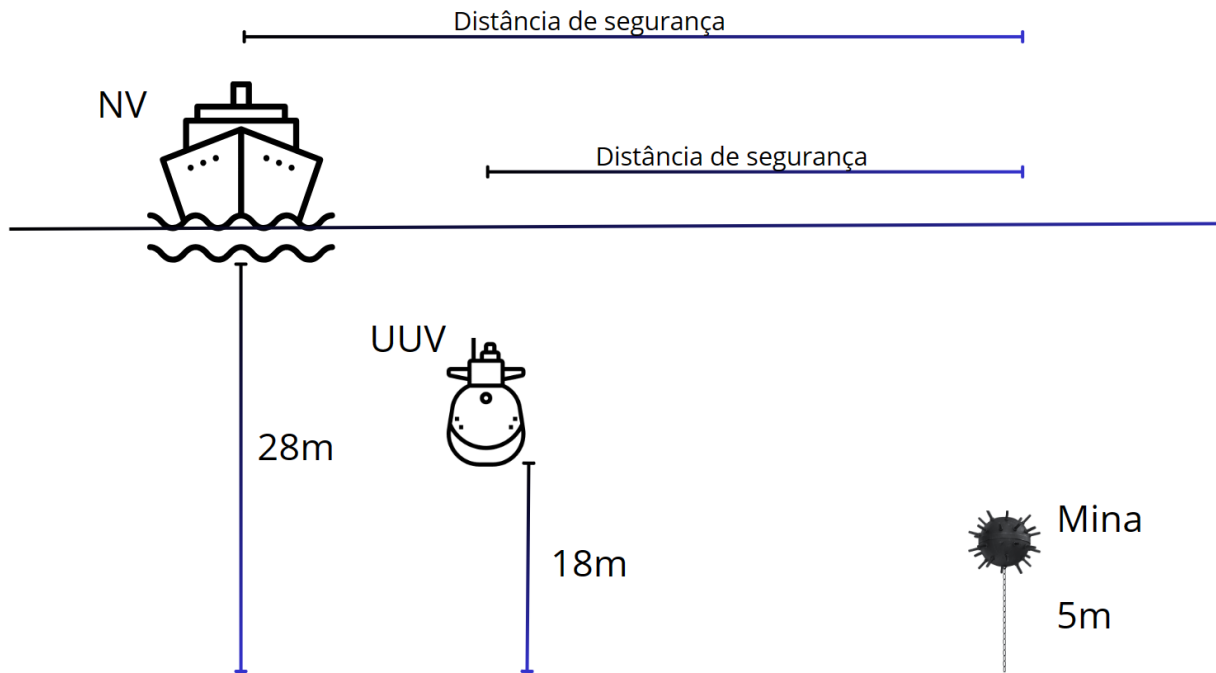
Fonte: Próprio autor (2023).

Como situação de contorno dos meios e da mina acústica (Figura 46), definiu-se:

- Profundidade da fonte – SL – do NV: 2 [m]. Essa profundidade representa a profundidade média do propulsor do navio;
- Profundidade da fonte – SL – do AUV: 12 [m]. Essa profundidade representa a profundidade média de operação do AUV;
- Profundidade do receptor – mina acústica: 25 [m]. Sendo assim, receptor está localizado a 5 [m] do fundo; e
- SNR para não acionamento da mina acústica: 0 [dB].



Figura 46 – Situação de contorno dos meios e da mina acústica.



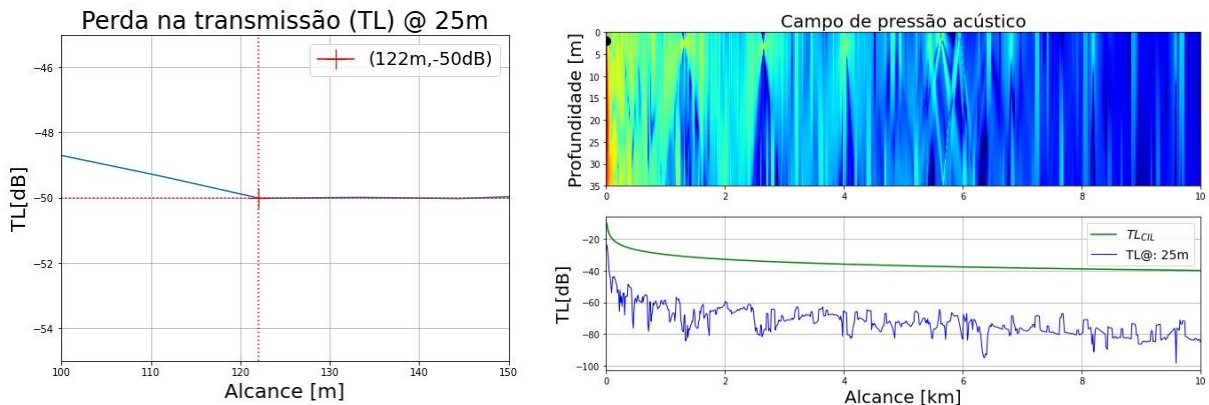
Fonte: Próprio autor (2023).

Inserem-se os dados no modelo TRACEO e calcula-se a que distância [m] as TL acontecerão.

As figuras abaixo mostram o cálculo da TL para as suas respectivas fontes e SL – em banda estreita – utilizando o TRACEO:

- NV, SL = (139,02 [dB]; 86,98 [Hz]) – Figura 47;
- NV, SL = (137,65 [dB]; 355,92 [Hz]) – Figura 48;
- AUV, SL = (119,11 [dB]; 52,15 [Hz]) – Figura 49; e
- AUV, SL = (108,08 [dB]; 1217,64 [Hz]) – Figura 50.

Figura 47 – Perdas na Transmissão, NV, SL = (139,02 [dB]; 86,98 [Hz]).



Fonte: TRACEO (2023).

Figura 48 - Perdas na transmissão, NV, SL = (137,65 [dB]; 355,92 [Hz]).

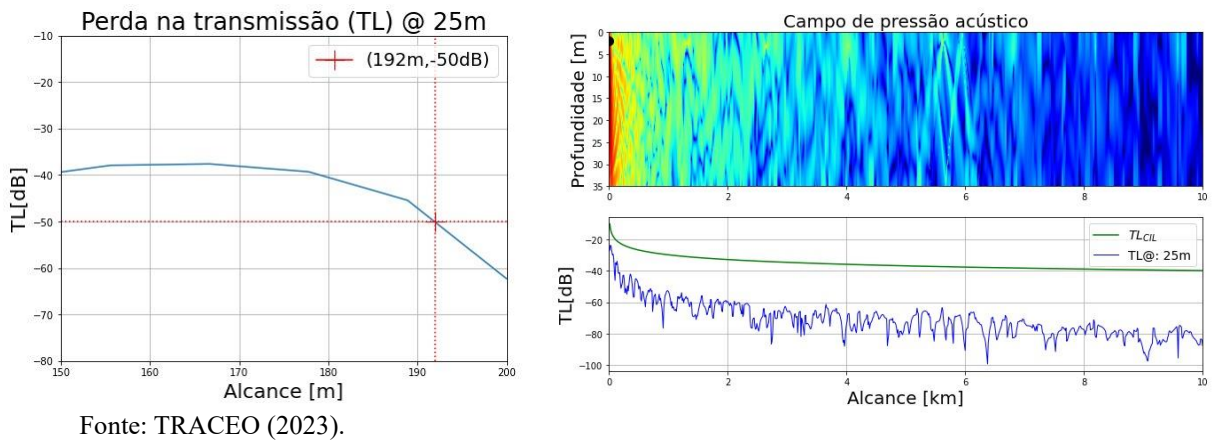


Figura 49 - Perdas na transmissão, AUV, SL = (119,11 [dB]; 52,15 [Hz]).

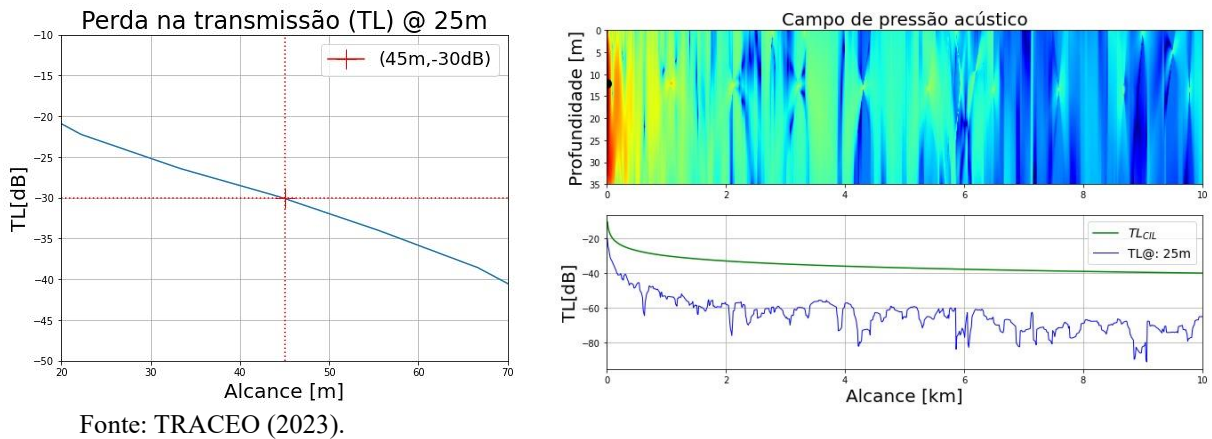
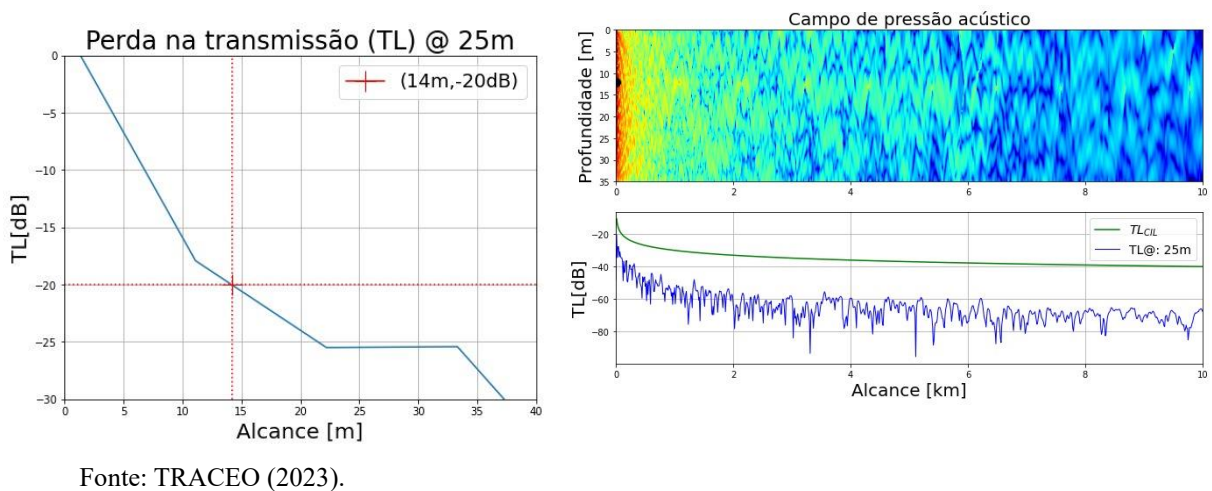


Figura 50 - Perdas na transmissão, AUV, SL = (108,08 [dB]; 1217,64 [Hz]).



As figuras a seguir mostram o cálculo da TL para as seguintes fontes e SL – em banda larga:

- AUV, SL = (95,93 [dB]; 1250 [Hz]) – Figura 51;
- AUV, SL = (114,89 [dB]; 50 [Hz]) – Figura 52;
- AUV, SL = (99,44 [dB]; 160 [Hz]) – Figura 53;
- NV, SL = (126,88 [dB]; 160 [Hz]); - Figura 54;
- NV, SL = (126,69 [dB]; 400 [Hz]) – Figura 55; e
- NV, SL = (130,64 [dB]; 80 [Hz]) – Figura 56.

Figura 51 - Perdas na transmissão, AUV, SL = (95,93 [dB]; 1250 [Hz]).

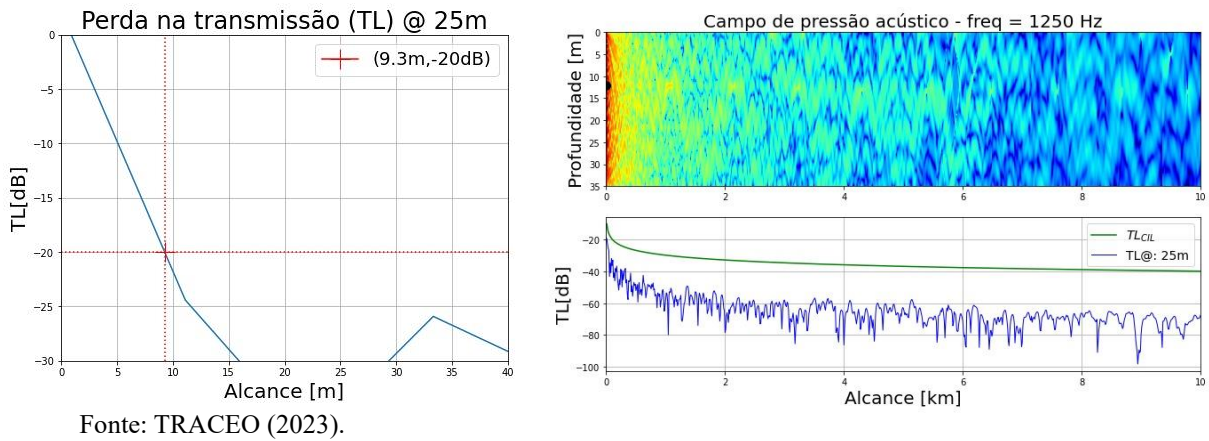


Figura 52 - Perdas na transmissão, AUV, SL = (114,89 [dB]; 50 [Hz]).

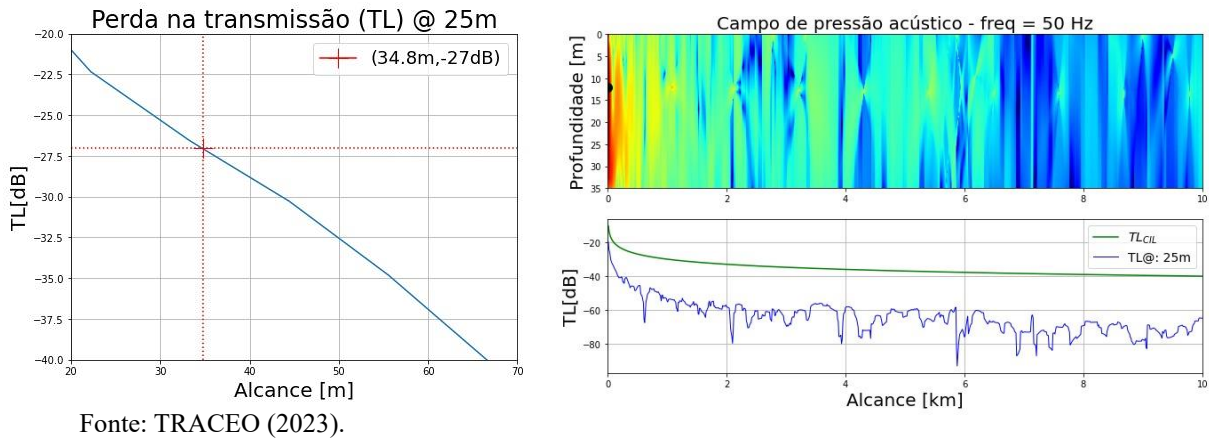
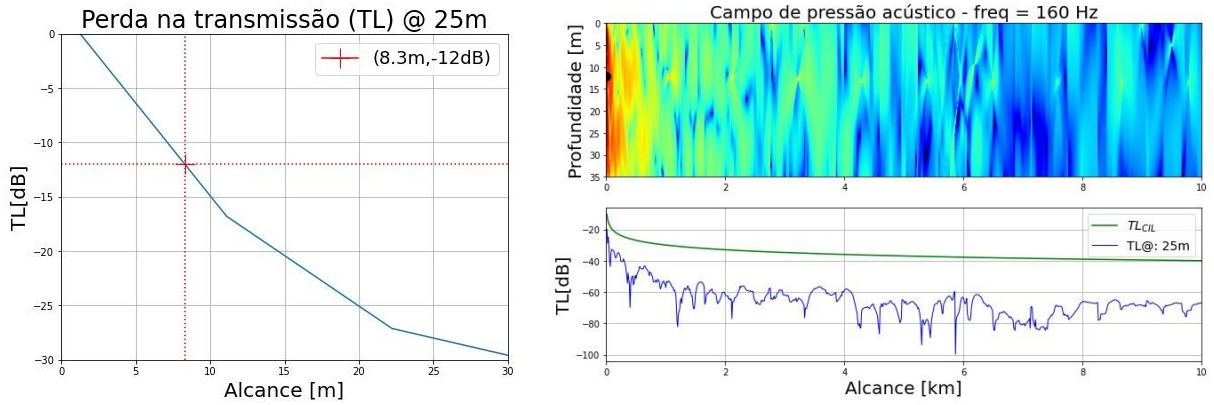
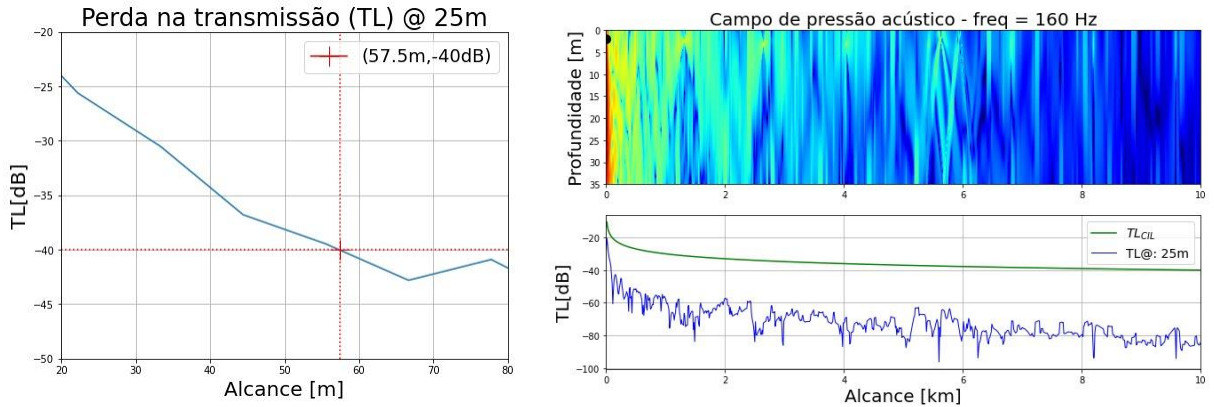


Figura 53 - Perdas na transmissão, AUV, SL = (99,44 [dB]; 160 [Hz]).



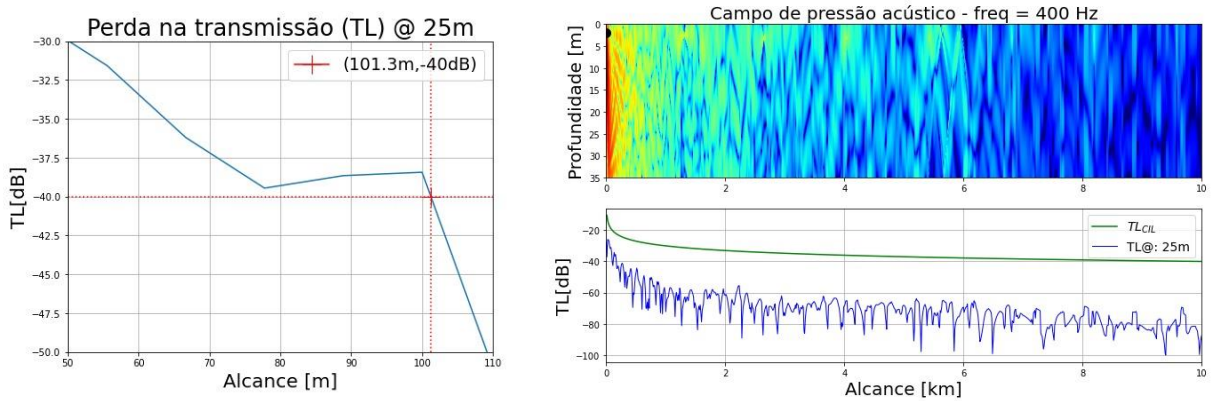
Fonte: TRACEO (2023).

Figura 54 - Perdas na transmissão, NV, SL = (126,88 [dB]; 160 [Hz]).



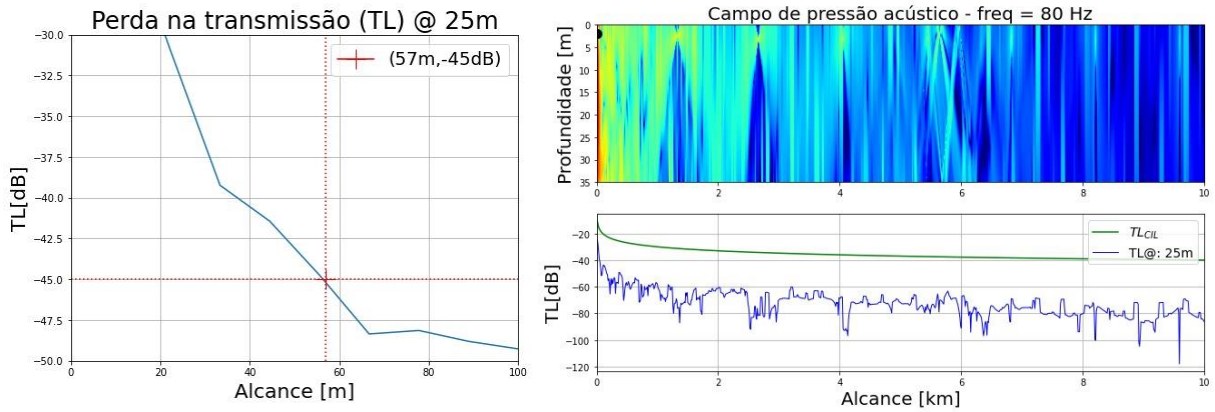
Fonte: TRACEO (2023).

Figura 55 - Perdas na transmissão, NV, SL = (126,69 [dB]; 400 [Hz]).



Fonte: TRACEO (2023).

Figura 56 - Perdas na transmissão, NV, SL = (130,64 [dB]; 80 [Hz]).



Fonte: TRACEO (2023).

Os resultados obtidos com o TRACEO são apresentados nas Tabelas 17 e 18.

Tabela 17 - d(TL), em [m] calculadas para o NV.

**RUÍDO AMBIENTE E NV**

RAMB		VARREDOR		TL [dB]	d [m]	RAMB		VARREDOR		TL [dB]	d [m]
Banda Estreita (Espectro Welch)		Banda Estreita (Espectro Welch)				Banda Larga (1/3 de oitava)		Banda Larga (1/3 de oitava)			
PSD [dB]	f [Hz]	PSD [dB]	f [Hz]			PSD [dB]	f [Hz]	PSD [dB]	f [Hz]		
90	25 - 500	139,015	86,98	-49,015	121	87,99	80	130,64	80	-42,65	49,5
		137,65	355,92	-47,65	190	89,04	160	126,88	160	-37,84	60,7
						89,26	400	126,69	400	-37,43	68,2

**Profundidade da fonte** 2 m

Fonte: Próprio autor (2023).

Tabela 18 - d(TL), em [m] calculadas para o AUV REMUS 100.

**RUÍDO AMBIENTE E AUV**

RAMB		AUV		TL [dB]	d [m]	RAMB		AUV		TL [dB]	d [m]
Banda Estreita (Espectro Welch)		Banda Estreita (Espectro Welch)				Banda Larga (1/3 de oitava)		Banda Larga (1/3 de oitava)			
PSD [dB]	f [Hz]	PSD [dB]	f [Hz]			PSD [dB]	f [Hz]	PSD [dB]	f [Hz]		
90	25 - 500	119,11	52,15	-29,11	44	89,3	50	114,89	50	-25,59	34,1
		108,08	1217,64	-18,08	12	89,04	160	99,44	160	-10,4	7,9
						76,11	1250	95,93	1250	-19,82	9,8

**Profundidade da fonte** 12 m

Fonte: Próprio autor (2023).

A partir das Tabelas 17 e 18, é exposto um compilado geral das análises da distância de segurança para cada meio, nas determinadas condições ambientais e TL. É comprovado que para a situação estabelecida, a distância de segurança para o NV é de 190 metros, e a do AUV REMUS 100 de 44 metros.

Assim, comprova-se que a distância de segurança do AUV REMUS 100 é quatro vezes menor que a do NV, além de sua profundidade de operação ser seis vezes mais profunda que a do NV.

Outro fator interessante que ocorre na frequência de 355 Hz está relacionado a sua propagação que acontece a uma longa distância, contrapondo os conceitos básicos da acústica submarina, que exprime que altas frequências se propagam menos que baixas frequências. Neste caso, a frequência de 355 Hz está propagando a uma distância maior que a frequência de 86,98 Hz, sendo uma situação atípica à acústica e passível de ser analisada mais a fundo em outros trabalhos.

Conclui-se que em operações de CMM o AUV REMUS 100 detém vantagens ante a um NV tanto em relação a distância de segurança quanto a profundidade de operação.

## 5 CONCLUSÃO

Analisando o que foi exposto, o AUV revolucionou o modo como as operações de CMM são realizadas. Sua capacidade de detectar, classificar minas de forma autônoma traz benefícios táticos e operacionais significativos. Do ponto de vista tático, a eliminação da necessidade de tripulantes reduz drasticamente o risco de acidentes e fatalidades. Além disso, o veículo pode operar em profundidades maiores e por períodos prolongados, garantindo uma maior cobertura e precisão na detecção de minas. Em termos operacionais o REMUS 100 oferece flexibilidade e agilidade, podendo ser lançado rapidamente em áreas de interesse e realizar missões autônomas. Sua capacidade de coletar e transmitir dados em tempo menor que os meios convencionais, permitem uma tomada de decisão mais informada e rápida. Em resumo, um AUV como o REMUS é uma ferramenta indispensável para as operações militares de combate às minas, proporcionando eficiência, segurança e flexibilidade.

No que diz respeito à modernização dos NVs Classe “Aratu” da MB, é uma iniciativa extremamente importante para a manutenção da segurança marítima. A GM é uma ameaça real para a navegação e a defesa da soberania, e a capacidade de detectar e neutralizar minas submarinas é essencial.

Portanto, além da modernização desses NVs, ressalta-se a aquisição dos NCMM. Esses meios possuem a incorporação de tecnologias avançadas, como sonares e sistemas de varredura, que permitam uma detecção e neutralização mais eficiente das minas. Além disso, a utilização dos UUVs, pode ser uma estratégia complementar nessas operações. Os AUVs podem ser usados para fazer o mapeamento detalhado das áreas suspeitas de minas, identificando possíveis ameaças e otimizando o tempo e os recursos das equipes de desativação.

O NV é uma embarcação projetada especificamente para operações de varredura de minas. Para isso, utiliza mecanismos de varredura mecânica e de influência.

Por outro lado, os AUVs são projetados para operar de modo independente, sem necessidade de uma tripulação a bordo. Os AUVs oferecem uma capacidade de patrulha e vigilância mais eficiente e autônoma. Ao contrário da necessidade de tripulação humana, os AUVs podem operar por longos períodos sem necessidade de descanso ou reabastecimento, cobrindo grandes áreas e realizando tarefas de monitoramento de forma eficaz.

No que tange a comparação de assinaturas acústicas do NV e do AUV REMUS 100, existem diferenças significativas. O veículo é mais silencioso e mais discreto em relação a discricção acústica, em comparação com o navio. Devido a essas características, como exposto no experimento, em um CM com minas de influência acústica. O REMUS 100 consegue ter

acesso a regiões mais próximas das minas. Assim, sua capacidade de locomoção em uma área suspeita impõe menos riscos aos meios navais comprovando sua eficiência ante aos NVs.

Portanto, as considerações finais sobre o uso dos AUVs pela MB são positivas, pois eles trazem uma série de vantagens e benefícios para as operações CMM. No entanto, o uso dos AUVs deve ser complementar à presença humana e não substitutiva, garantindo assim uma abordagem equilibrada e eficiente para as operações de CMM.

## 5.1 Considerações Finais

A GM é uma atividade de extrema importância que exige uma atenção considerável e investimentos substanciais. Isso ocorre porque os Estados precisam garantir a manutenção de sua soberania nacional. A simples suspeita da presença de minas marítimas em uma determinada região pode levar à obstrução do tráfego marítimo, o que impacta significativamente a economia e a segurança do pessoal e do material. Com os avanços contínuos na tecnologia e o desenvolvimento de doutrinas no campo da GM, os UUVs surgem como uma opção essencial para reduzir riscos e aprimorar a eficiência das operações de CMM.

Nesse contexto, é fundamental ressaltar as vantagens táticas e operacionais oferecidas pelos AUVs:

**Eficiência operacional:** Os AUVs aumentam consideravelmente a eficiência das operações de detecção e neutralização de minas, uma vez que podem ser programados para realizar missões sem a necessidade de intervenção humana constante. Isso significa que a MB pode lançar mais AUVs simultaneamente para cobrir uma área maior, acelerando o processo garantindo a segurança das embarcações e tripulações.

**Capacidade de detecção de minas:** Os REMUS 100 são projetados para oceanografia, porém seus sensores avançados permitem seu uso para detectar e identificar minas submarinas de forma precisa e confiável. Essa capacidade é essencial para proteger rotas marítimas importantes e instalações estratégicas ao longo da costa brasileira.

**Reduções de riscos para tripulações:** As operações de CMM são altamente arriscadas, uma vez que requerem a aproximação e desativação de explosivos poderosos. Ao utilizar AUVs em vez de embarcações tripuladas, a MB pode reduzir significativamente o risco para suas tripulações, minimizando o perigo de ferimentos ou fatalidades.

**Custo-benefício:** Embora a aquisição e manutenção dos AUVs possa representar um investimento significativo, a longo prazo eles, podem oferecer uma relação custo-benefício vantajosa. A redução de despesas com reparos de embarcações e danos ao meio ambiente,



associados aos riscos inerentes às operações de CMM, pode compensar os custos do uso dos AUVs.

Integração com os meios navais: Os AUVs podem ser facilmente integrados a outras capacidades da MB, como drones aéreos, USVs e navios de guerra, para ampliar ainda mais o poder de detecção e defesa contra ameaças de minagem. Essa integração possibilita uma atuação sinérgica das forças navais, proporcionando uma maior vantagem estratégica. Salienta-se a modularidade que as FCT possuirão quando prontas, podendo servir de plataforma de lançamento para esses veículos.

Enfim, a utilização dos AUVs para a GM oferece diversas vantagens, com aumento da eficiência operacional, capacidade de detecção de minas, redução de riscos para as tripulações, custo-benefício favorável e integração com outros meios navais. Portanto, a MB deve considerar seriamente a aquisição de incorporação desses recursos em suas operações de defesa costeira.

## 5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Por fim, como sugestão para futuros trabalhos, sugere-se os seguintes tópicos para serem abordados:

- Emprego de UUVs na área fluvial;
- A modularidade da FCT e operação de CMM;
- A aplicação dos NCMM Classe “*Koster*” na MB;
- Evolução de UUVs;
- ISR com UUVs;
- Comparação com minas de influência acústica com SNR diferente de 0;
- Estudos comparativos em outros locais de interesse e com diferentes navios e AUVs; e
- Estimativa de distância segura de aproximação, para minas de influência acústica, para diferentes AUVs e NV.

Não obstante, propõem-se a intensificação e ampliação de pesquisas e estudos que viabilizem o aprofundamento no campo dos UUVs. Tal iniciativa proporcionará a MB um arcabouço teórico para consulta e aplicação, principalmente no que diz respeito ao gerenciamento de projetos para aquisição e manutenção desses veículos.

## REFERÊNCIAS

- AGARWALA, Nitin. Monitoring the ocean environment using robotic systems: Advancements, trends, and challenges. **Marine Technology Society Journal**, v. 54, n. 5, p. 42-60, 2020.
- AGARWALA, Nitin. Role of policy framework for disruptive technologies in the maritime domain. **Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs**, v. 14, n. 1, p. 1-20, 2021.
- AGARWALA, Nitin. Integrating UUVs for naval applications. **Maritime Technology and Research**, v. 4, n. 3, p. 254470-254470, 2022.
- ALBON, Chris R. **Gaddafi Mines Misrata's Harbor Using "Red Cross" Helicopters**. Un Dispatch, 2011. Disponível em: <https://undispatch.com/gaddafi-mines-misratas-harbor-using-red-cross-helicopters/>. Acesso em: 22 out. 2023.
- ALVES, Igor; LAMI, Leandro. A guerra de minas e o seu papel ao longo da história. **Revista Passadiço**, v. 32, n. 39, p. 16-19, 2019.
- ANSI. Specification for octave-band and fraction- octave-band analog and digital filters. **Specification for octave-band and fraction- octave-band analog and digital filters**, [S. l.], 2009.
- BAE, Inyeong; HONG, Jungpyo. Survey on the Developments of Unmanned Marine Vehicles: Intelligence and Cooperation. **Sensors**, v. 23, n. 10, p. 4643, 2023.
- BATMANI, Yazdan; NAJAFI, Shahabeddin. Event-triggered  $H_{\infty}$  depth control of remotely operated underwater vehicles. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems**, v. 51, n. 2, p. 1224-1232, 2019.
- BLIDBERG, D. Richard. The development of autonomous underwater vehicles (AUV); a brief summary. In: **Ieee Icra**. 2001. p. 122-129.
- BOARD, Naval Studies *et al.* **Naval mine warfare: operational and technical challenges for naval forces**. National Academies Press, 2001.
- BONALUME NETO, Ricardo. **Americano veio caçar minas**. São Paulo: Especial para Folha, 7 ago. 1994. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/fsp/1994/8/07/mais!/35.html>. Acesso em: 20 out. 2023.
- BOVIO, Edoardo; SACLANT UNDERSEA RESEARCH CENTRE LA SPEZIA (ITALY) LA SPEZIA ITALY. **A review of the application of UUV technology to mine countermeasures**. 1999.
- BRASIL. Câmara dos Deputados. **Relatório setorial da Defesa no Orçamento de 2023 aponta carência de recursos para institutos militares**. Brasília: Câmara dos Deputados, 6 dez. 2022a. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/925341-relatorio-setorial-da-defesa-no-orcamento-de-2023-aponta-carencia-de-recursos-para-institutos->

militares/#:~:text=A%20%C3%A1rea%20de%20Defesa%20tem,conta%20a%20varia%C3%A7%C3%A3o%20da%20infla%C3%A7%C3%A3o. Acesso em: 20 out. 2023.

BRASIL. Marinha do Brasil. Centro de Hidrografia da Marinha. **Escala Beaufort**. Rio de Janeiro. [s.d.]. Disponível em: [https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/u2035/escala\\_beaufort.pdf](https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/u2035/escala_beaufort.pdf). Acesso em: 20 out. 2023.

BRASIL. Marinha do Brasil. Centro de Hidrografia da Marinha. **Escala Douglas do Estado do Mar**. Rio de Janeiro. [2018?]. Disponível em: [https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/u2035/estado\\_do\\_mar.pdf](https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/u2035/estado_do_mar.pdf). Acesso em: 20 out. 2023.

BRASIL. Marinha do Brasil. **Curso Expedito de Varredura para Oficiais**. 2022b. Apresentação de slides no Power Point. *Pen Drive*.

BRASIL. Marinha do Brasil. Departamento de História da DPHDM. **Carioca, Navio Mineiro Corveta (1939-1960)**. Rio de Janeiro: Departamento de História da DPHDM, 2020a. Disponível em: <https://www.repositorio.dphdm.mar.mil.br/handle/ripcmb/847044>. Acesso em: 20 out. 2023.

BRASIL. Marinha do Brasil. Departamento de História da DPHDM. **Javari, Navio Varredor Auxiliar (1960-1982)**. Rio de Janeiro: Departamento de História da DPHDM, 2021. Disponível em: <https://www.repositorio.dphdm.mar.mil.br/handle/ripcmb/847215?show=full>. Acesso em: 20 out. 2023.

BRASIL. Marinha do Brasil. Estado-Maior da Armada. EMA-305: **Doutrina Militar Naval**. 1 rev. Brasília: 2017.

BRASIL. Marinha do Brasil. Estado-Maior da Armada. **Plano Estratégico da Marinha 2040**. Brasília, 2020b.

BRASIL. Ministério da Defesa. Estado-Maior Conjunto das Forças Armadas. **MD35-G-01: Glossário das Forças Armadas**. 5. ed. Brasília: Ministério da Defesa, 2015.

BRASIL. Ministério da Defesa. Estado-Maior Conjunto das Forças Armadas. **MD40-M-01: Manual de Boas Práticas para Gestão do Ciclo de Vida de Sistemas de Defesa**. 1. ed. Brasília: Ministério da Defesa, 2019.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Orçamento e Finanças**. Brasília: Ministério da Defesa, 2022c. Disponível em: <https://www.gov.br/defesa/pt-br/assuntos/orcamento-e-financas-1>. Acesso em: 20 out. 2023.

BRITTING, Kenneth R. **Inertial navigation systems analysis**. 2010.

BUTTON, Robert W. et al. A survey of missions for unmanned undersea vehicles. **National Defense Research Institute. RAND Corporation**, v. 223, 2009.

CACCAVALE, F.; UCHIYAMA, M. Cooperative manipulation. **Springer Handbook of Robotics**, Ed. Siciliano, B. and Khatib, O., p. 989-1006, 2008.

CALLOW, Hayden J. Signal processing for synthetic aperture sonar image enhancement. 2003.

CARESS, David W. *et al.* High-resolution multibeam, sidescan, and subbottom surveys using the MBARI AUV D. Allan B. **Marine habitat mapping technology for Alaska**, p. 47-69, 2008.

CAREY, William M.; EVANS, Richard B. **Ocean ambient noise: measurement and theory**. Springer Science & Business Media, 2011.

CLAUS, Brian; BACHMAYER, Ralf. Terrain-aided navigation for an underwater glider. **Journal of Field Robotics**, v. 32, n. 7, p. 935-951, 2015.

COSTA, Pedro Humberto de Acciolly. **Imagens VSA**. Destinatário: Matheus Dias da Silva Rodrigues. Rio de Janeiro: 19 out. 2023. mensagem eletrônica.

DAGNINO, Basílio. Do Navio Varredor ao Caça-Minas e ao Varre-Caça-Minas. **Revista do Clube Naval**, v. 1, n. 393, p. 18-21, 2020.

DE MOURA, Natanael Nunes. Detecção e classificação de sinais de sonar passivo usando métodos de separação cega de fontes. **COPPE/UFRJ**, 2013.

DI BELLA, Antonino; REMIGI, Francesca. Prediction of noise of moored ships. In: **Proceedings of Meetings on Acoustics**. AIP Publishing, 2013.

DISSANAYAKE, BGMB; COSTA, Ricardo. **Unmanned Underwater Vehicles (UUV) Based on Mine Counter Measurers**. Orientador: Lt Cdr Sumit Rathore. 2023. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Superior) - Anti Submarine Warfare School, Kochi, Kerala, India, 2023. Disponível em: <https://www.repositorio.mar.mil.br/handle/ripcmb/846219> . Acesso em: 19 out. 2023.

DoD, U. S. The navy unmanned undersea vehicle (UUV) master plan. **US Navy, November**, v. 9, p. 90, 2004. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA511748>. Acesso em: 19 out. 2023.

DoD, Navy, U.S., Government, **21 st Century Complete Guide to Naval Mine Warfare: Modern MCM Systems, Marine Mammal Systems, Dolphins, Sea Lions, Avenger-Class, Mine Countermeasures, Mine Threat Control**, 2014, 5582 p. E-Book.

DOSITS. **Galleries**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://dosits.org/>. Acesso em: 23 out. 2023.

DUNA. **II DESAFIO UNIVERSITÁRIO DE NAUTIMODELISMO**. [S. l.], 2014. Disponível em: <https://oficialduna.wixsite.com/duna-oficial/propulsao>. Acesso em: 1 dez. 2023.

DUNCAN, Robert Caruthers. **America's use of sea mines**. US Naval Ordnance Laboratory, 1962.

EDSINGER, Aaron; KEMP, Charles C. Human-robot interaction for cooperative manipulation: Handing objects to one another. In: **RO-MAN 2007-The 16th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication**. IEEE, 2007. p. 1167-1172.

ERICKSON, Andrew S.; MURRAY, William S.; GOLDSTEIN, Lyle J. **Chinese Mine Warfare: A PLA Navy's Assassin's Mace' Capability**. China Maritime Studies Institute, US Naval War College, 2009.

EVANGELIO, A. *et al.* Guidance for developing maritime unmanned systems (MUS) capability. **Combined Joint Operations from the Sea Centre of Excellence Report**, v. 12, p. 029-02, 2012.

FLAHERTY, Chris O'. **Naval Minewarfare: Politics to Practicalities**. Gloucester: Choir Press, 2019. 414 p. Disponível em: [https://books.google.com.br/books/about/Naval\\_Minewarfare.html?id=fIcnYgEACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.br/books/about/Naval_Minewarfare.html?id=fIcnYgEACAAJ&redir_esc=y) . Acesso em 20 out. 2023.

FONSECA, Maurílio M. Arte Naval. Volume I e II. **Serviço de Documentação da Marinha. Rio de Janeiro**, 2002.

FREEDBERG JR, Sydney J. Sowing The Sea with Fire: The Threat Of Sea Mines. **Breaking Defense**, v. 30, 2015. Disponível em: <https://breakingdefense.com/2015/03/sowing-the-sea-with-fire-how-russia-china-iran-lay-mines-and-how-to-stop-them/>. Acesso em: 19 out. 2023.

GAFUROV, Salimzhan A.; KLOCHKOV, Evgeniy V. Autonomous unmanned underwater vehicles development tendencies. **Procedia Engineering**, v. 106, p. 141-148, 2015.

GASQUE, Kelley Cristine Gonçalves Dias. **Teoria fundamentada: nova perspectiva à pesquisa exploratória**. 2007.

GEARS OF HISTORY. **Mines: Mine Warfare, its origins and development: Early ideas ( ? - 1844)**. [S. l.], 2.sem. 2023. Disponível em: <https://gearsofhistory.com/home/2018/7/23/mine-warfare-its-origins-and-development-part-1-early-ideas-1844>. Acesso em: 20 out. 2023.

GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de pesquisa**. Plageder, 2009.

GIL, Antonio Carlos et al. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

GONÇALVES, Fabio Borges. Guerra de minas. **Revista Passadiço**, v. 34, n. 41, p. 80-82, 2021.

GREENE, Austin *et al.* Side scan sonar: A cost-efficient alternative method for measuring seagrass cover in shallow environments. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 207, p. 250-258, 2018.

HARTMANN, Gregory K.; TRUVER, Scott. **Weapons that wait: mine warfare in the United States Navy**. 1991.

HE, Ying; WANG, Dao Bo; ALI, Zain Anwar. A review of different designs and control models of remotely operated underwater vehicle. **Measurement and Control**, v. 53, n. 9-10, p. 1561-1570, 2020.

HEGARTY, Stephanie. Guerra na Ucrânia: as 20 milhões de toneladas de grãos que o país não consegue exportar. **BBC News**, 2022. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/internacional-61603590>. Acesso em: 12 set. 2023.

HEO, Jinyeong; KIM, Junghoon; KWON, Yongjin. Technology development of unmanned underwater vehicles (UUVs). **Journal of Computer and Communications**, v. 5, n. 7, p. 28-35, 2017.

HODGES, Richard P. **Underwater acoustics: Analysis, design and performance of sonar**. John Wiley & Sons, 2011.

HUBERT, Juliana. **Paravane A Arma Esquecida Da II Guerra**. Brasil: Zheit, 30 mar. 2021. Disponível em: <https://zheit.com.br/post/paravane-a-arma-esquecida-da-ii-guerra>. Acesso em: 20 out. 2023.

JIANG, Yanqing *et al.* Statics variation analysis due to spatially moving of a full ocean depth autonomous underwater vehicle. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, v. 11, n. 1, p. 448-461, 2019.

KATO, Ryosuke *et al.* Investigation of a 3-D undersea positioning system using electromagnetic waves. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 69, n. 8, p. 4967-4974, 2021.

LI, Wei; WANG, Jinling. Magnetic sensors for navigation applications: an overview. **The Journal of navigation**, v. 67, n. 2, p. 263-275, 2014.

LOGGINS, Chester D. A comparison of forward-looking sonar design alternatives. In: **MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 01CH37295)**. IEEE, 2001. p. 1536-1545.

LOTT, Arnold S. **Most Dangerous Sea: A History of Mine Warfare and an Account of US Navy Mine Warfare Operations in World War II and Korea**. Annapolis: U.S. Naval Institute, 1959. 322 pp.

MAGNOLI, Demétrio. **História das guerras**. Editora Contexto, 2011.

MACEDO, Carlos Eduardo Ribeiro *et al.* AS NOVAS POSSIBILIDADES PARA A GUERRA DE MINAS NO BRASIL. **Revista de Villegagnon**, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <https://www.redebim.dphdm.mar.mil.br/vinculos/000004/000004f8.pdf>. Acesso em: 20 out. 2023.

MAJUMDAR, Dave. Sea-Mines: The Most Lethal Naval Weapon On The Planet. **The National Interest**, v. 1, 2016.

MAKICHUCK, Dave. **Robot gives US Marines ‘eyes in the water’**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://asiatimes.com/2021/10/robot-gives-us-marines-eyes-in-the-water/>. Acesso em: 22 out. 2023.

MANDT, Magne; GADE, Kenneth; JALVING, Bjørn. Integrating DGPS-USBL position measurements with inertial navigation in the HUGIN 3000 AUV. In: **Proceedings of the 8th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, Saint Petersburg, Russia**. 2001.

MANLEY, Justin E.; SMITH, Jeff. Rapid development and evolution of a micro-UUV. In: **OCEANS 2017-Anchorage**. IEEE, 2017. p. 1-4.

MARTIN, Bradley *et al.* Advancing Autonomous Systems. **Rand Corporation**, p. 9-40, 2019.

MARTINI, Fernando De. **Guerra de minas: a experiência operacional sueca, a classe Koster e sistemas da Saab**. [S. l.]: Poder Naval, 1 nov. 2017. Disponível em: <https://www.naval.com.br/blog/2017/11/01/guerra-de-minas-experiencia-operacional-sueca-classe-koster-e-sistemas-da-saab/>. Acesso em: 20 out. 2023.

MARTOS, Gabriel *et al.* Remotely Operated Underwater Vehicle (ROV) 100% Report. **EML: Miami, FL, USA**, 2013.

MELIA, Tamara Moser. **Damn the torpedoes: a short history of US naval mine countermeasures, 1777-1991**. Naval Historical Center, Department of the Navy, 1991.

MENDONÇA, Emerson Coelho; TELES, Adams Soares; MENDES, Vilson Berilli. Desenvolvimento de um veículo submarino autônomo de baixo custo utilizando manufatura aditiva. **Revista Pesquisa Naval**, Rio de Janeiro, ed. 32, p. 10-16, 2020. Disponível em: <https://portaldeperiodicos.marinha.mil.br/index.php/pesquisanaval/article/view/2826/2739>. Acesso em: 20 out. 2023.

MORALEZ, João Paulo. **O futuro dos navios-varredores da Marinha do Brasil**. [S. l.]: Tecnologia & Defesa, 5 nov. 2019. Disponível em: <https://tecnodefesa.com.br/o-futuro-dos-navios-varredores-da-marinha-do-brasil/>. Acesso em: 20 out. 2023.

MUNAFÒ, Andrea; FERRI, Gabriele. An acoustic network navigation system. **Journal of Field Robotics**, v. 34, n. 7, p. 1332-1351, 2017.

NACIONES UNIDAS. ONU. **Carta de las Naciones Unidas**. [S. l.], 1945. Disponível em: <https://www.un.org/es/about-us/un-charter>. Acesso em: 20 out. 2023.

NAÇÕES UNIDAS. ONU. **A Carta das Nações Unidas**. [S. l.], 16 set. 2007. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91220-carta-das-na%C3%A7%C3%B5es-unidas>. Acesso em: 20 out. 2023.

NAÇÕES UNIDAS. Nações Unidas. ONU: Comércio marítimo internacional atinge 9,2 bilhões de toneladas pela primeira vez na história. In: **ONU: Comércio marítimo internacional atinge 9,2 bilhões de toneladas pela primeira vez na história**. Brasília, DF, Brasil, 6 dez. 2013. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/64493-onu-com%C3%A9rcio->

mar%C3%ADtimo-internacional-atinge-92-bilh%C3%B5es-de-toneladas-pela-primeira-vez-na. Acesso em: 19 out. 2023.

NAVAL HISTORY AND HERITAGE COMMAND. **Naval Mine Warfare**. U.S.A, 2021. Disponível em: <https://www.history.navy.mil/browse-by-topic/exploration-and-innovation/naval-mine-warfare.html>. Acesso em: 22 out. 2023.

NEEDHAM, Joseph; PING-YÜ, Ho, Science and civilization in China, vol. 5. Chemistry and chemical technology, part. 7: military technology; the gunpowder epic. **Cambridge University Press**, 1986. p. 192-210.

NEIRA, Javier *et al.* Review on unmanned underwater robotics, structure designs, materials, sensors, actuators, and navigation control. **Journal of Robotics**, v. 2021, p. 1-26, 2021.

NOAA OCEAN EXPLORATION. **Synthetic Aperture Sonar (SAS)**. USA: ON&T, [s.d.]. Disponível em: <https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/sonar/sas.html#>. Acesso em: 20 out. 2023.

NORTEK. **New to subsea navigation?**. [S. l.]: Nortek, [s.d.]. Disponível em: <https://www.nortekgroup.com/knowledge-center/wiki/new-to-subsea-navigation>. Acesso em: 20 out. 2023.

OCEAN NEWS & TECHNOLOGY. **WHAT'S THE DIFFERENCE BETWEEN AN ROV AND AN AUV?**. Kansas Ave Stuart, FL: ON&T, 26 nov. 2018. Disponível em: <https://www.oceannews.com/news/subsea-and-survey/jamstec-orders-remus-6000-auv-from-hydroid>. Acesso em: 20 out. 2023.

OPEN OCEANS. **Welcome to Open Oceans**. [S. l.]: Open Oceans, [202?]. Disponível em: <https://www.openoceans.net/>. Acesso em: 22 out. 2023.

PADILHA, Luiz. **ComForMinVar – 60 anos trabalhando para manter a segurança da navegação no Brasil**. Brasil: Defesa Aérea & Naval, 11 maio 2021. Disponível em: <https://www.defesaareanaval.com.br/naval/comforminvar-60-anos-trabalhando-para-manter-a-seguranca-da-navegacao-no-brasil>. Acesso em: 20 out. 2023.

PADILHA, Luiz. **IPqM assima Termo de Parceria para desenvolvimento de Veículo Submarino Autônomo**. Brasil: Defesa Aérea & Naval, 6 jul. 2015. Disponível em: <https://www.defesaareanaval.com.br/naval/ipqm-assima-termo-de-parceria-para-desenvolvimento-de-veiculo-submarino-autonomo>. Acesso em: 20 out. 2023.

PADILHA, Luiz. **Saab oferece para a Marinha um sistema completo para a Guerra de Minas**. [S. l.]: Defesa Aérea & Naval, 1 abr. 2023b. Disponível em: <https://www.defesaareanaval.com.br/naval/saab-oferece-para-a-marinha-um-sistema-completo-para-a-guerra-de-minas>. Acesso em: 20 out. 2023.

PASSARO, Vittorio MN *et al.* Gyroscope technology and applications: A review in the industrial perspective. **Sensors**, v. 17, n. 10, p. 2284, 2017.



PIERRI, Francesco et al. Cooperative manipulation of an unknown object via omnidirectional unmanned aerial vehicles. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, v. 100, p. 1635-1649, 2020.

POST, Jerrold M.; BARAM, Amatzia. **Saddam is Iraq: Iraq is Saddam**. DIANE Publishing, 2002.

REED, Scott; PETILLOT, Yvan; BELL, J. Automated approach to classification of mine-like objects in sidescan sonar using highlight and shadow information. **IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation**, v. 151, n. 1, p. 48-56, 2004.

RIBEIRO, Beatriz Alencar. **Comportamento Espectral de Alvos: Assinatura Espectral da Água**. CIAA, Rio de Janeiro, RJ. 26 mai. 2023. Apresentação Power Point. 101 slides. color. Disponível em: Pen Drive. Acesso em: 20 out. 2023.

RIOS, John J. **Naval mines in the 21st century can NATO navies meet the challenge?**. 2005. Tese de Doutorado. Monterey, California. Naval Postgraduate School.

RJE INTERNATIONAL. **WHAT'S THE DIFFERENCE BETWEEN AN ROV AND AN AUV?**. Irvine CA: RJE INTERNATIONAL, 19 jul. 2017. Disponível em: <https://www.defesaareanaval.com.br/naval/navio-caca-minas-plataforma-tecnologica>. Acesso em: 20 out. 2023.

RODRIGUEZ, Orlando C. The TRACEO ray tracing program. **Universidade do Algarve-Signal Processing Laboratory**, 2010.

ROGOWAY, Tyler. **The Revolutionary War Gave Birth To The Age Of Naval Mine Warfare**. U.S.A, 2020. Disponível em: <https://www.thedrive.com/the-war-zone/4256/the-revolutionary-war-gave-birth-to-the-age-of-naval-mine-warfare>. Acesso em: 22 out. 2023.

SENNÁ, Cláudio José d'Alberto. O poder das minas. **Revista da EGN**, v. 17, n. 2, p. 199-211, 2011.

SMITH, R. Michael. Till, Geoffrey. Seapower: A Guide for the Twenty-First Century. **International Social Science Review**, v. 80, n. 3-4, p. 188-190, 2005.

SILVA, Gustavo Mesquita da; JABOR, Pablo Medeiros; STADTLOBER, Marcelo Ermindo Elias. SISPRES: Ampliação da Área de Abrangência e Inclusão de Novos Parâmetros Ambientais. **A Ressurgência**, Brasil, p. 18-20, 2010. Disponível em: <https://www.repositorio.mar.mil.br/bitstream/ripcmb/26578/1/00000960.pdf>. Acesso em: 21 out. 2023.

SOUZA, Adriano V, **Potencialidades do emprego dos veículos submarinos autônomos em operações militares na Marinha do Brasil**. 2015. 32 f. Monografia (Curso Superior) – Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, 2015.

SZTUROMSKI, Bogdan. **Classification of sea mines**. ResearchGate, 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/figure/Classification-of-sea-mines\\_fig1\\_282584057](https://www.researchgate.net/figure/Classification-of-sea-mines_fig1_282584057). Acesso em: 22 out. 2023.

TAL, Asaf; KLEIN, Itzik; KATZ, Reuven. Inertial navigation system/Doppler velocity log (INS/DVL) fusion with partial DVL measurements. **Sensors**, v. 17, n. 2, p. 415, 2017.

TANG, Yulin *et al.* AUV-Based Side-Scan Sonar Real-Time Method for Underwater-Target Detection. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 11, n. 4, p. 690, 2023.

THOMPSON, Andrew R. Evaluating the combined UUV efforts in a large-scale mine warfare environment. **DTIC Document2015.(d) Comparison of evaporation pheromone rate Q2 model Fig**, v. 10, 2015.

THYSSENKRUPP. **Frigates**: Marine Systems. Alemanha: Thyssenkrupp, [2023?]. Disponível em: <https://www.thyssenkrupp-marinesystems.com/en/products-services/surface-vessels/frigates>. Acesso em: 20 out. 2023.

URICK, Robert; KUPERMAN, W. A. **Ambient noise in the sea**. 1989.

VAGANAY, JÉ [Rcirc] OME; BELLINGHAM, James G.; LEONARD, John J. Comparison of fix computation and filtering for autonomous acoustic navigation. **International Journal of Systems Science**, v. 29, n. 10, p. 1111-1122, 1998.

VOGT, René. Guerra de minas. **Revista Marítima Brasileira**, v. 139, n. 07/09, p. 115-128, 2019a.

VOGT, René. Guerra de minas. **Revista Marítima Brasileira**, v. 139, n. 10/12, p. 126-142, 2019b.

VOGT, René. Guerra de minas. **Revista Marítima Brasileira**, v. 140, n. 04/06, p. 105-105, 2020.

XAVIER, Fábio Contrera. **ASSINATURA BIOACÚSTICA DE COSTÕES ROCHOSOS: CARACTERIZAÇÃO, MODELAGEM E APLICAÇÕES BIOTECNOLÓGICAS**. 2021. 51 f. Monografia (MBA) - Aluno, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.repositorio.mar.mil.br/bitstream/ripcmb/845160/1/Tese%20Fabio%20Contrera%20Xavier.pdf>. Acesso em: 20 out. 2023.

WHITE, Ryan. **What is the difference between a minehunter and a minesweeper?**. [S. l.]: Naval Post, 10 mar. 2021. Disponível em: <https://navalpost.com/minehunter-minesweeper-mine-countremeasures-vessel-difference/>. Acesso em: 20 out. 2023.

WHOI. Oceanographic Systems Lab. **New to subsea navigation?**: Remus 100. Woods Hole, Massachusetts, U.S.A: Woods Hole Oceanographic Institution, [s.d.]. Disponível em: <https://www2.whoi.edu/site/osl/vehicles/remus-100/>. Acesso em: 20 out. 2023.

WILTGEN, Guilherme. **Navio Caça-Minas**: Plataforma Tecnológica. Brasil: Defesa Aérea & Naval, 22 maio 2023. Disponível em: <https://www.defesaaereanaval.com.br/naval/navio-caca-minas-plataforma-tecnologica>. Acesso em: 20 out. 2023.

WINNEFELD JR, Admiral James; AHMAD, Captain Syed. The Other Mine Warfare Will Work. In: **US Naval Institute Proceedings**. 2018.

WOOD, Stephen; INZARTSEV, A. V. Autonomous underwater gliders. **Underwater vehicles**, p. 499-524, 2009.

WOODWARD, John; ROBINSON, Patrick. One Hundred Days: The Memoirs of the Falklands Battle Group Commander. **Naval War College Review**, v. 46, n. 2, p. 11, 1993.

YAN, Jing *et al.* Tracking control of a remotely operated underwater vehicle with time delay and actuator saturation. **Ocean Engineering**, v. 184, p. 299-310, 2019.

YAMAMOTO, Ikuo; MORINAGA, Akihiro; URA, Koki. Development of remotely operated underwater vehicle and applications to the sea. In: **ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference**. ISOPE, 2019. p. ISOPE-I-19-203.

ZHANG, Bingbing *et al.* Autonomous underwater vehicle navigation: a review. **Ocean Engineering**, p. 113861, 2023.