



SECRETARIA DE ESTADO DE DEFESA CIVIL
CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
REVISTA CIENTÍFICA SOLDADO DO FOGO

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE SONAR SUBAQUÁTICO PORTÁTIL NO APOIO AOS SALVAMENTOS MARÍTIMOS NAS PRAIAS DO RIO DE JANEIRO

Thiago Luis da Silva dos Santos^{1*}, Maria Clara Raposo Barcelos dos Reis^{1*}, Fábio Barbosa Louza², Diego Martins da Cunha Gomes¹ e Thiago de Barros Ramos¹

¹ Academia de Bombeiro Militar Dom Pedro II - CBMERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

² Marinha do Brasil, Ministério da Defesa, Brasil.

*Autor correspondente. E-mail: thiago.ear108@gmail.com

RESUMO: Introdução: O Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro é responsável pelos salvamentos marítimos nas praias do estado, protegendo vidas em algumas das faixas de areia mais populares do Brasil e do mundo. O emprego de tecnologias no apoio ao resgate de vítimas submersas ainda é considerado escasso, aumentando a dependência das capacidades humanas. Objetivo: Avaliar a eficácia do sonar Aquaeye na localização de corpos submersos em praias, próximo à linha de arrebentação. Métodos: Foram realizados 180 testes na Praia de Copacabana, variando operadores do sonar, ângulo de varredura, tempo de operação, distância e tipo de objeto. As amostras incluíram manequins e corpos humanos. Os dados foram analisados quanto à normalidade (Kolmogorov-Smirnov) e à diferença entre ensaios com desfechos positivo x negativo (Mann-Whitney). Em seguida, aplicou-se regressão logística para avaliar a influência das variáveis operacionais ($p < 0,05$). Resultados: Tempo de operação e ângulo de varredura mostraram-se fatores mais relevantes para a eficácia do sonar, enquanto a distância do objeto não apresentou significância estatística, embora resultados positivos se concentrem em menores distâncias. O equipamento não conseguiu distinguir manequins de corpos humanos. Conclusão: Embora o sonar Aquaeye apresente potencial em operações de salvamento aquático, existem limitações relevantes, especialmente quanto à precisão, à sensibilidade e à incapacidade de diferenciar tipos de corpos em diferentes condições ambientais.

Palavras-chave: Bombeiros, Salvamento aquático, Praias, Tecnologia sonar, Acústica submarina.

ABSTRACT: Introduction: The Military Fire Department of the State of Rio de Janeiro is responsible for maritime rescue operations along the state's beaches, protecting lives in some of the most popular coastal areas in Brazil and worldwide. The use of technological resources to support the rescue of submerged victims remains limited, increasing reliance on human capabilities. Objective: To evaluate the effectiveness of the Aquaeye sonar system in locating submerged bodies on beaches, particularly near the surf zone. Methods: A total of 180 tests were conducted at Copacabana Beach, varying sonar operators, scanning angles, operating time, distance, and target type. The samples included mannequins and human bodies. Data were assessed for normality using the Kolmogorov-Smirnov test and for differences between positive and negative outcome trials using the Mann-Whitney test. Subsequently, logistic regression analysis was performed to evaluate the influence of operational variables ($p < 0.05$). Results: Operating time and scanning angle proved to be the most relevant factors for sonar effectiveness, whereas target distance did not reach statistical significance, although positive detections were more frequent at shorter distances. The device was unable to differentiate mannequins from human bodies. Conclusion: Although the Aquaeye sonar system demonstrates potential for use in aquatic rescue operations, relevant limitations remain, particularly regarding accuracy, sensitivity, and the inability to distinguish different types of submerged bodies under varying environmental conditions.

Keywords: Firefighters, Water rescue, Beaches, Sonar technology, Underwater acoustics.





1. INTRODUÇÃO

O Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro (CBMERJ) é a principal instituição responsável pelos salvamentos marítimos nos 86 km de extensão de orla das praias do Rio de Janeiro. Segundo dados oficiais, publicados em Boletim Ostensivo, foram registrados, oficialmente, 24.789 socorros envolvendo operações marítimas¹. Neste cenário, é importante que o CBMERJ, além de prezar pelo aprimoramento físico, técnico e psicológico dos seus guarda-vidas, também esteja investindo constantemente em novos equipamentos operacionais que possuam melhores tecnologias, visando, sobretudo, aumentar a eficiência do serviço prestado².

O serviço aquático nas praias do Rio de Janeiro se dá com os guarda-vidas assumindo o serviço, nas praias, no seu devido posto de salvamento. De acordo com a sequência operacional definida no Manual de Salvamento no Mar³, o militar realizará eficaz prevenção, lançando mão de todo material disponível para este fim. No caso de avistar uma vítima em potencial situação de afogamento, o guarda-vidas realizará o salvamento dela.

Na circunstância de uma vítima submergir, o militar deverá prosseguir com o salvamento, na tentativa de encontrar a vítima submersa. Atualmente, caso esse procedimento não seja suficiente para localizar e emergir a vítima, o militar deve sinalizar a necessidade de apoio operacional com um simples giro da camiseta. Ainda, não havendo embarcações próximas, o militar deve retornar ao posto de salvamento e solicitar apoio para o salvamento, via contato telefônico ou rádio³.

De maneira empírica, podemos observar que, a contar do momento em que a vítima submerge e o guarda-vidas não consegue encontrá-la, cada minuto decorrido é determinante para as chances de sobrevivência da vítima⁴. Contudo, a única maneira que o militar tem de potencializar seus esforços individuais é recorrendo a apoio externo e isso leva tempo, que é a variante crucial para uma vítima submersa, uma vez que o tempo de submersão determina a gravidade do afogamento⁵. Além disso, reduzir o tempo de submersão é fundamental para prevenir complicações secundárias que podem ocorrer devido à falta de oxigenação prolongada. Assim, a rapidez no resgate é vital para preservar a saúde da vítima e minimizar as consequências adversas de um afogamento⁶.

Em relação ao panorama do salvamento aquático no Rio de Janeiro, nos primeiros nove dias do ano de 2024, o Estado enfrentou um aumento de 460% nos casos de afogamentos e resgates em relação ao mesmo período do ano de 2023, tendo sido realizados 2437 resgates⁷. Os números de afogamentos no Brasil não diferem significativamente do restante do mundo, mas por possuir uma das maiores áreas espelhadas banháveis durante o ano todo, apresenta o maior número de resgates aquáticos e um dos maiores números de óbitos no planeta⁸.





Considerando o cenário exposto, este estudo visa investigar a eficácia do sonar portátil nas operações de salvamento do CBMERJ, analisando como sua utilização pode impactar na localização de vítimas submersas. A tecnologia em questão trata-se de um sonar portátil que conta com tecnologia assistida por inteligência artificial na leitura das informações, podendo, segundo a empresa criadora, identificar corpos submersos, diferenciando-os de objetos e obstáculos⁹. O equipamento pode varrer uma área de até 8.000 metros quadrados de superfície de água em menos de 5 minutos, seja em ambientes marítimos ou lacustres, conforme informado no manual do fabricante, o que pode significar uma relevante mudança nas operações táticas de busca⁹. Ou seja, o sonar pode fornecer a localização de vítimas segundos após terem submergido, podendo aumentar significativamente as chances de sobrevivência de um afogado⁴.

No estudo realizado, o equipamento foi testado, analisado e avaliado em um simulado operacional que aproximou as condições de teste com as condições reais de um resgate. A intenção do estudo foi observar o desempenho do equipamento nas condições das praias do Rio de Janeiro, além disso, os usuários foram bombeiros militares especializados da corporação - guarda-vidas e mergulhadores - aqueles que, em geral, atuam nesse tipo de salvamento. Nos resultados obtidos no simulado foi possível observar que a operação não se mostrou tão simples como o produto sugeria, ainda, foi possível constatar padrões de condições de uso que trouxeram resultados mais ou menos precisos, como variações na distância do objeto, tempo de operação, ângulo de varredura e tipo de objeto a ser identificado.

Em relação às ferramentas existentes na área de busca e resgate de corpos submersos nas praias do Rio de Janeiro, há uma lacuna significativa de estudos abrangentes e detalhados sobre a eficácia e a eficiência das tecnologias disponíveis, incluindo, nesse contexto, estudos sobre sonares subaquáticos no salvamento aquático.

Este estudo teve como objetivo analisar a eficácia do sonar portátil nos socorros às vítimas submersas nas praias, realizado pelo Corpo de Bombeiros Militar do Rio de Janeiro. Assim, ao abordar essa necessidade, os estudos realizados contribuirão para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes e seguras no processo de busca e resgate, fornecendo informações para futuras pesquisas e aplicações práticas nesse campo crítico, além de revelar oportunidades para otimização e aprimoramento do equipamento.

2. METODOLOGIA

2.1 Delineamento do Estudo

A primeira parte do estudo foi realizada a partir da revisão de literatura. Foram adotadas estratégias específicas na seleção e análise dos documentos. Inicialmente, os critérios de seleção incluíram estudos publicados nos últimos dez anos, com foco em tecnologias de busca e resgate





subaquático, especificamente o uso de sonares em operações de salvamento. Apenas artigos publicados em periódicos revisados por pares e que apresentavam resultados empíricos foram incluídos.

As bases de dados pesquisadas incluíram Scielo, IEEE Xplore, PubMed e Google Scholar, selecionadas pela relevância no campo de tecnologia e saúde. A qualidade dos artigos foi avaliada utilizando critérios como a clareza metodológica, tamanho da amostra, validade interna e externa dos estudos, além da relevância prática dos resultados. A estratégia de análise envolveu a leitura crítica dos artigos para identificar os principais achados, lacunas e recomendações, sendo utilizada uma análise qualitativa com categorização temática dos principais pontos discutidos na literatura sobre o uso de sonares em resgates subaquáticos.

A pesquisa foi estruturada em três etapas principais: a revisão da literatura sobre tecnologias de resgate, a análise de casos práticos em que o dispositivo foi utilizado e a realização de testes com o equipamento. Durante os testes, foram coletados dados sobre variáveis como a distância, medida por um medidor de distância; o tipo de objeto a ser identificado; o tempo de operação, cronometrado; e o ângulo de varredura, informado pelo equipamento sonar, com o objetivo de identificar padrões que influenciam a precisão do equipamento. Após os testes, as informações coletadas foram analisadas e utilizadas para a elaboração dos gráficos e análise dos resultados.

O local escolhido foi a Praia de Copacabana, Rio de Janeiro, considerado estratégico devido ao elevado número de incidentes que demandam operações de salvamento marítimo. Adotou-se, portanto, um delineamento experimental de natureza aplicada, com abordagem qualitativa e quantitativa, para avaliar a eficácia de equipamentos sonar subaquáticos portáteis nas atividades de busca e resgate de vítimas submersas. O objetivo central foi identificar as vantagens e desafios associados ao uso de sonar portátil no contexto operacional dos guarda-vidas, e propor recomendações para sua implementação nas operações de resgate no litoral carioca.

2.2 Aspectos éticos

O objeto deste estudo foi o desempenho técnico de um equipamento de sonar portátil, e não os indivíduos que dele participaram. Os guarda-vidas e mergulhadores do CBMERJ atuaram exclusivamente como operadores e colaboradores técnicos na execução dos ensaios. As variáveis coletadas e tabuladas, a saber, ângulo de varredura, distância do alvo, tempo de operação e desfecho da detecção, referem-se ao funcionamento do dispositivo. Não foram mensurados, registrados ou analisados quaisquer dados pessoais, de saúde, biológicos, de identificação ou de desempenho individual dos participantes.

Por essa razão, o estudo não se caracteriza como pesquisa com seres humanos na acepção





que enseja apreciação obrigatória por Comitê de Ética em Pesquisa, nos termos do sistema CEP/CONEP (Resolução CNS nº 466/2012 e Resolução CNS nº 510/2016, no que aplicável).

Ainda assim, foram adotados cuidados éticos compatíveis com a natureza operacional do estudo. A participação foi voluntária e todos os colaboradores foram previamente informados sobre os objetivos, os procedimentos e os riscos, tendo manifestado seu consentimento por escrito. Foram fornecidos equipamentos de segurança durante a operação em ambiente aquático. As informações foram tratadas de forma confidencial, sem divulgação de qualquer dado individual identificável.

2.3 Princípios de funcionamento do sonar

O comportamento acústico no meio subaquático é regido por diversos fenômenos. A refração do som ocorre quando ondas acústicas mudam de direção ao atravessar camadas de água com diferentes velocidades de propagação¹⁰. Isso acontece devido às variações na temperatura, salinidade e profundidade, o que altera a velocidade do som no mar. Segundo a Lei de Snell, essa mudança de direção está diretamente relacionada à razão entre as velocidades do som nas diferentes camadas, podendo causar zonas de sombra ou focos de som em determinados locais¹¹.

Outro fenômeno importante é a reflexão, que ocorre tanto na superfície do mar quanto no fundo. Na superfície, a reflexão é fortemente influenciada pelo estado do mar, com ondas agitadas provocando variações rápidas na intensidade e frequência do sinal acústico recebido. Isso pode resultar em perdas significativas de energia do sinal, dependendo do grau de agitação¹².

As fontes de ruído que afetam a detecção acústica incluem a turbulência gerada por correntes marítimas, atividade biológica, e ruído de embarcações¹³. Esse ruído de fundo pode mascarar os sinais desejados, dificultando a detecção precisa de vítimas submersas. Em sistemas sonares ativos, as ondas acústicas transmitidas podem se dispersar em diferentes direções e sofrer interferência com o ruído ambiental, dificultando a análise do eco retornado¹⁴.

A velocidade do som no mar depende principalmente de três fatores: temperatura, salinidade e pressão. Em águas mais quentes e salinas, a velocidade do som tende a aumentar¹³. A cada grau de elevação na temperatura da água, a velocidade do som pode aumentar em aproximadamente 2,7 m/s. Em termos de salinidade, para cada aumento de uma parte por mil (ppt) na salinidade, a velocidade do som aumenta cerca de 1,13 m/s. Por fim, a pressão, que aumenta com a profundidade, também tem um efeito positivo na velocidade do som, com uma taxa de variação de 0,016 m/s por metro de profundidade¹².

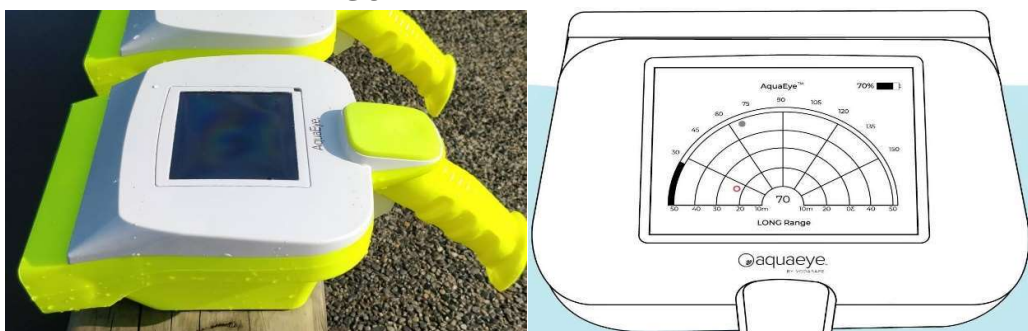
Em regiões costeiras, como a praia, a variação da velocidade do som é relativamente menor devido à homogeneidade das condições ambientais, podendo-se considerar uma região isotérmica com velocidade média de 1500 m/s¹¹.



2.4 O SONAR - AquaEye®

O AquaEye®, conforme exposto na Figura 1, é um sonar portátil avançado, projetado para auxiliar em operações de resgate de vítimas submersas. Equipado com tecnologia de ultrassom e inteligência artificial, o AquaEye® é capaz de identificar corpos humanos embaixo d'água e fornecer uma representação visual em tempo real para os socorristas, facilitando uma resposta mais rápida em situações de afogamentos.

FIGURA 1 – SONAR PORTÁTIL



Fonte: SITE AQUAEYE® (2024)

O equipamento é composto por vários componentes, dentre eles estão: um sensor que emite e recebe sinais ultrassônicos (100 a 400 kHz), uma tela LCD que exibe as informações processadas, mostrando pontos de interesse com a possível localização de vítimas submersas, um botão para ajustar o alcance da varredura, um gatilho que ativa a varredura do ambiente subaquático, e uma alça que facilita o manuseio do dispositivo⁹.

Dentre as principais funcionalidades do AquaEye®, destaca-se a capacidade de realizar varreduras e identificar corpos submersos em um raio de até 50 metros, segundo o fabricante. O equipamento oferece modos de exibição que permitem ao usuário alternar entre a visualização detalhada dos alvos detectados (*Target Display*), conforme Figura 3, e uma visualização mais geral, no mapa de eco (*Echo Map Display*), conforme Figura 2¹⁵. Essas possibilidades, proporcionam uma compreensão mais ampla da área de busca. Além disso, o AquaEye® possui classificação IP68, o que garante sua resistência à água e à submersão de até 5 metros⁹.

CICLO DE OPERAÇÃO DO SONAR PORTÁTIL



1. TRANSMISSÃO: Transdutor emite pulso acústico (*chirp*)



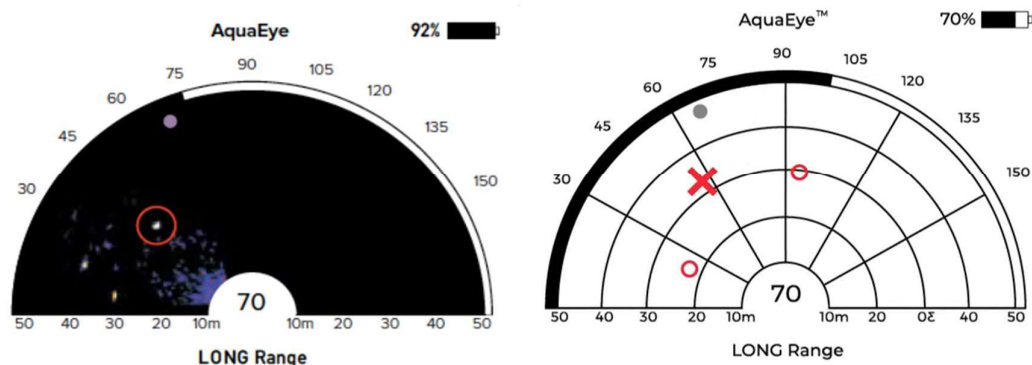
2. PROPAGAÇÃO: Onda sonora viaja pelo meio aquático

↓
3. REFLEXÃO: Alvo reflete parte da energia acústica

↓
4. RECEPÇÃO: Transdutor detecta eco de retorno

↓
5. PROCESSAMENTO: Filtro casado + IA identificam padrões

Figura 2 – Mapa eco (imagem à esquerda) e *Target Display* (imagem à direita)



Fonte: SITE AQUAEYE® (2024)

O AquaEye® é especialmente indicado para utilização em ambientes aquáticos variados, como lagos, oceanos, bacias de retenção e piscinas naturais¹⁵.

É importante seguir algumas precauções ao operar um sonar portátil, pois alguns fatores podem influenciar na operação do sonar, tais como a existência de correntes elétricas, substâncias ou detritos submersos e a exposição prolongada ao sol que pode causar o aumento da temperatura⁹.

2.5 Fenômenos de Interferência em Ambientes Costeiros

A literatura sobre o tema identifica cinco principais fontes de interferência em operações de sonar costeiro¹⁶:

- 1 Reverberação de Volume: Causada por bolhas, plâncton e partículas em suspensão
- 2 Reverberação de Superfície: Reflexões da superfície do mar agitada
- 3 Reverberação de Fundo: Ecos do fundo marinho e objetos bentônicos
- 4 Ruído Ambiente: Fontes biológicas, antropogênicas e hidrodinâmicas
- 5 Multipercurso: Múltiplas trajetórias do sinal entre fonte e receptor

Estudos sobre ruído oceânico, estabeleceram que curvas espectrais que demonstram que em frequências de 100 Hz a 1 MHz, o ruído ambiente em áreas costeiras pode variar de 40 a 80



dB re 1 μ Pa, dependendo das condições do mar e atividade antropogênica¹⁷.

2.6 Simulado operacional de busca e resgate de vítimas submersas em Copacabana

O simulado operacional realizado na praia de Copacabana teve como principal objetivo reproduzir as situações enfrentadas pelos guarda-vidas em cenários de emergência, envolvendo a busca e o resgate de vítimas submersas, permitindo a aquisição de dados para o experimento.

Durante o simulado, o sonar subaquático foi utilizado em três cenários distintos, com o intuito de testar sua eficácia na localização de corpos submersos em diferentes condições operacionais.

2.6.1 Primeiro cenário: localização de um manequim submerso

Neste cenário, foram conduzidos testes para avaliar a capacidade do sonar em detectar um manequim submerso, representando uma vítima que teria afundado cerca de quatro minutos após ser avistada por um guarda-vidas. Esse cenário reflete uma situação comum em resgates reais, onde a rápida reação e a precisão na localização são cruciais. O guarda-vidas, após observar a vítima a partir de seu posto de observação, percorreu uma distância de 350 metros na areia, seguida de uma natação de 10 metros no mar, carregando o sonar portátil. A eficácia do dispositivo foi testada ao tentar localizar o manequim submerso, com variações na distância e no ângulo de varredura.

2.6.2 Segundo cenário: detecção de um mergulhador submerso

O segundo cenário diferia do primeiro ao substituir o manequim por um mergulhador humano, simulando a presença de um corpo real submerso. Essa variação foi introduzida para verificar se o sonar conseguiria distinguir entre um corpo humano e outros objetos submersos. Mais uma vez, o guarda-vidas seguiu o mesmo procedimento operacional, com o sonar sendo utilizado para localizar o mergulhador após a mesma sequência de corrida e natação. Este teste avaliou a sensibilidade do equipamento em detectar alvos de diferentes densidades e composições.

2.6.3 Terceiro cenário: identificação com dois alvos

No terceiro e último cenário, um manequim e um mergulhador foram submersos simultaneamente em posições próximas. Este teste avaliou a capacidade do sonar em diferenciar e identificar múltiplos alvos submersos em uma situação mais complexa. A complexidade do cenário visava simular um ambiente de resgate onde múltiplas vítimas poderiam estar envolvidas ou um cenário no qual a vítima está presa junto a um objeto, exigindo do equipamento não apenas precisão, mas também a habilidade de discernir entre diferentes tipos de objetos.





2.7 Metodologia para coleta de dados experimentais

Os dados experimentais utilizados neste trabalho foram obtidos a partir de ensaios realizados por guarda-vidas e mergulhadores do CBMERJ, que se voluntariaram para os testes. Esse grupo foi escolhido por representar os profissionais que irão operar o equipamento nas operações de salvamento, assegurando que a avaliação da eficácia do sonar fosse conduzida em condições similares às do cenário real.

A amostra deste estudo foi composta por uma série de 180 ensaios, por conveniência operacional, já que foi considerado suficiente para analisar a precisão alcançada do sonar. As condições marítimas apresentavam temperatura média de 25°C¹⁸, ondas de aproximadamente 0,5 metro e água limpa, livre de impurezas visíveis. Os testes foram realizados em distâncias variando entre 5 e 45 metros, com o intuito de avaliar plenamente a eficácia do sonar, considerando que a empresa Aquaeye propõe que o dispositivo seja capaz de identificar vítimas a até 50 metros de distância.

É prudente informar que, embora o cenário típico de salvamento nas praias do Rio de Janeiro seja representado pelo local escolhido, configuram apenas um tipo de ambiente, não sendo possível generalizar os resultados para todos os cenários possíveis de afogamento.

Durante os testes, a angulação de varredura do sonar foi variada em seis níveis: 15°, 30°, 45°, 90°, 105° e 180°. Além disso, foram registrados outros dois fatores: a distância do objeto a ser identificado e o tempo de operação do sonar. A angulação foi medida pelo próprio aparelho com a sua tecnologia, o tempo foi medido com um cronômetro e a distância foi medida com um medidor de distância.

A amostra incluiu dois tipos de alvos para verificar a capacidade de diferenciar um ser humano de um objeto inanimado: 74 testes foram realizados com um manequim submerso e 106 testes com um corpo humano.

Por fim, foram realizados 20 testes adicionais com o sonar para avaliar sua capacidade de identificar um paredão rochoso, um píer e o fundo do mar. Embora todos os testes tenham apresentado resultados positivos, esses dados foram descartados, pois não se referem diretamente à atividade dos guarda-vidas, nem constituem um ponto de interesse para este estudo. O foco deste trabalho é exclusivamente a eficácia na detecção de corpos e objetos submersos, alinhada ao objetivo principal de avaliar o desempenho do sonar em situações de resgate nas praias do Rio de Janeiro.

Após a análise dos resultados, os participantes do estudo, guarda-vidas e mergulhadores do CBMERJ, receberam um relatório resumido com os principais achados da pesquisa, destacando as conclusões sobre a eficácia do sonar nas operações de salvamento. Isso permitirá que eles





compreendam como suas contribuições impactaram o estudo e auxiliará no aprimoramento das práticas de resgate.

2.8 Tratamento estatístico

Os dados coletados foram tabulados e exportados para análise estatística no software JASP Versão 0.19.1 (JASP Team, Amsterdam, Holanda), visando identificar os principais fatores que influenciam a eficácia do sonar. Inicialmente foram aplicados testes de aderência à normalidade (Kolmogorov-Smirnov) e os resultados, não paramétricos, foram tratados como mediana e intervalos interquartis.

Posteriormente os resultados com desfechos positivos e negativos foram separados para análise de variância entre as características registradas para cada ensaio (Mann-Whitney Test) e para estudo de regressão logística, buscando evidenciar a influência do ângulo de varredura, tempo de operação e distância do objeto na predição do desfecho da busca. O nível de confiabilidade adotado para todas as análises foi de 95% ($p < 0,05$).

3. RESULTADOS

Os dados expostos nas estatísticas descritivas, conforme a Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3, foram coletados através da realização dos 180 testes mencionados anteriormente. Embora a proposta da empresa criadora do sonar fosse de que o equipamento seria capaz de diferenciar entre o manequim e o corpo humano, essa distinção não foi alcançada. Assim, os resultados positivos (detecção positiva da vítima) e negativos (ausência de detecção) referem-se apenas à identificação de um ponto de interesse no Mapa Eco.

Tabela 1 – Estatísticas descritivas gerais

	Mediana	Teste de Shapiro-Wilk	P-value do Shapiro-Wilk	25th percentile	75th percentile
Distância do Objeto (m)	26.000	0.955	< .001	15.000	35.000
Ângulo de varreduras	45.000	0.927	< .001	30.000	60.000
Tempo de operação (s)	55.000	0.963	< .001	34.000	70.000

Fonte: Os autores (2024)

Tabela 2 – Estatísticas descritivas por resultado





		Mediana	25th percentile	75th percentile
Distância do Objeto (m)	POSITIVO	21.000	11.000	30.750
Distância do Objeto (m)	NEGATIVO	29.000	20.000	38.000
Ângulo de varreduras	POSITIVO	45.000	15.000	60.000
Ângulo de varreduras	NEGATIVO	60.000	45.000	75.000
Tempo de operação (s)	POSITIVO	44.500	25.000	64.000
Tempo de operação (s)	NEGATIVO	69.000	47.000	82.000

Fonte: Os autores (2024)

Tabela 3 – Estatísticas descritivas por objeto

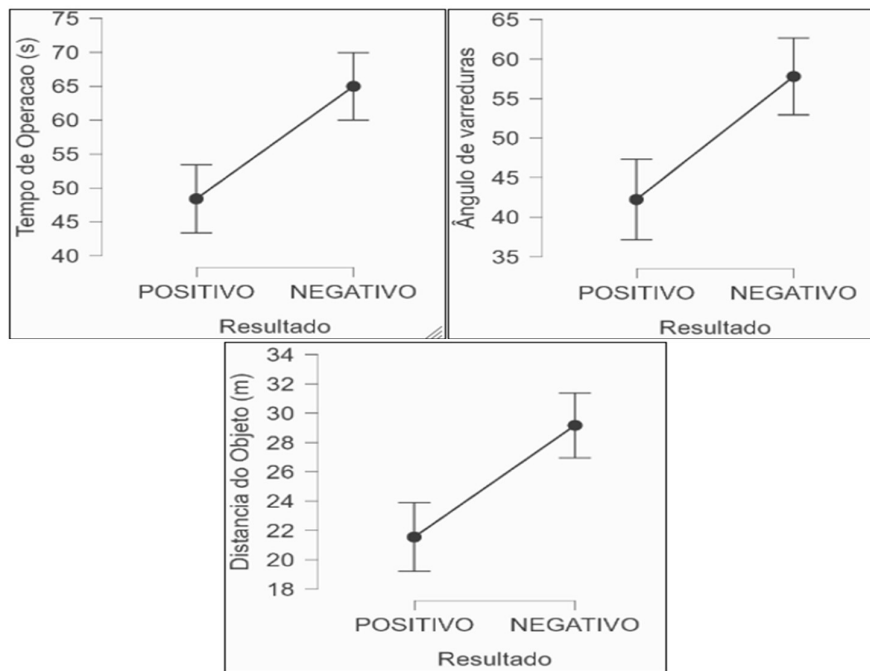
		Mediana	25th percentile	75th percentile
Distância do Objeto (m)	CORPO HUMANO	25.000	13.000	35.000
Distância do Objeto (m)	MANEQUIM	26.000	17.250	34.000
Ângulo de varreduras	CORPO HUMANO	45.000	30.000	60.000
Ângulo de varreduras	MANEQUIM	52.500	30.000	60.000
Tempo de operação (s)	CORPO HUMANO	53.500	32.000	70.000
Tempo de operação (s)	MANEQUIM	59.500	40.000	71.500

Fonte: Os autores (2024)

Considerando a análise variância entre os dados registrados dos ensaios com ensaios positivos e negativos, foi possível observar diferenças estatisticamente significativas para as três variáveis mensuradas ($p < 0,001$). Este dado aponta para influência direta dos ângulos de varredura, tempo de operação e distância do objeto na busca com o sonar. As comparações estão representadas na Figura 4:

Figura 3 – Variância entre características de operação x resultado na detecção da vítima





Fonte: Os autores (2024)

A regressão logística foi utilizada para analisar a influência de quatro variáveis — ângulo de varredura, distância do objeto, tempo de operação e tipo de objeto — na probabilidade dos ensaios terem desfecho negativo conforme pode-se observar na figura 5. O modelo de regressão logística foi estatisticamente significativo, conforme indicado pelos valores de pseudo- R^2 : McFadden (0,117), Nagelkerke (0,156) e Tjur (0,143), demonstrando que a variação nos resultados pode ser explicada pelas variáveis incluídas. Além disso, o teste de razão de verossimilhança (LR $\chi^2 = 29,160$, com $p < 0,001$) confirmou que o modelo é estatisticamente significativo, ou seja, ao menos uma das variáveis tem um impacto relevante nos resultados.

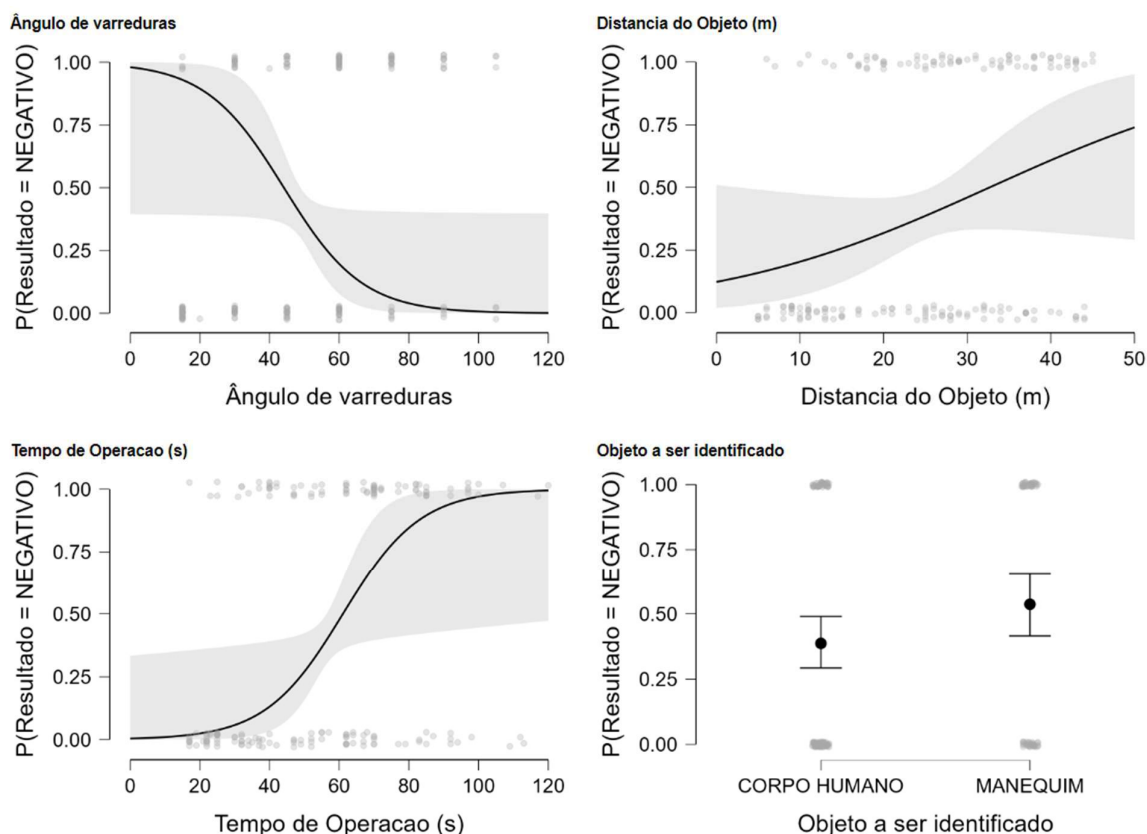
O ângulo de varredura reduzido aumenta 92,5% a chance de obter um resultado positivo ($p=0,080$). Isso indica que, à medida que o ângulo de varredura aumenta, a chance de um resultado negativo tende a aumentar. Já a distância do objeto, com um coeficiente de 0,060 ($p = 0,106$), não mostrou uma relação estatisticamente significativa.

Já o tempo de operação mostrou-se uma variável significativa, com um coeficiente de 0,060 ($p = 0,038$), revelando uma relação positiva com a probabilidade de resultados negativos. Isso indica que quanto maior o tempo de operação, maior é a chance de ocorrerem desfechos negativos. Portanto, essa variável se destaca como um fator relevante para otimizar a eficácia dos ensaios, sugerindo que tempos de operação mais curtos poderiam reduzir a probabilidade de resultados negativos.

Dessa forma, o resultado aumentou 14,4% a chance de êxito quando buscado o manequim e apenas 7,8% quando foi procurado um corpo humano ($p < 0,001$). Por fim, o desempenho preditivo do modelo foi satisfatório, com sensibilidade de 0,610 e especificidade de 0,884, indicando acurácia global de 85%.

A análise gráfica reforçou os resultados obtidos, evidenciando as relações identificadas entre as variáveis. Assim, o estudo demonstra que o tempo de operação e o tipo de objeto são os principais fatores que influenciam a probabilidade de desfechos negativos, enquanto o ângulo de varredura tem uma influência marginal e a distância do objeto não apresentou impacto significativo na regressão logística. Esses achados fornecem subsídios valiosos para a otimização dos procedimentos dos ensaios, visando aumentar a eficácia e a eficiência das operações.

Figura 4 – Gráficos de regressão logística entre o resultado negativo e as variáveis



Fonte: Os autores (2024)

3.1 Diagrama de Desempenho Operacional

Figura 5 – Melhores condições de detecção.



ZONAS DE DESEMPENHO DO SONAR

ZONA ÓTIMA (0-20m): Detecção > 90%

- Ângulo: 30-60° | Tempo: 60-120s | SNR > 15 dB

ZONA EFICAZ (20-35m): Detecção 70-90%

- Ângulo: 30-45° | Tempo: 80-120s | SNR 10-15 dB

ZONA LIMITE (35-50m): Detecção < 70%

- Ângulo: < 30° | Tempo: > 100s | SNR < 10 dB

Fonte: Os autores (2024)

4. DISCUSSÃO

Inicialmente, cabe destacar que, embora a distância do objeto não tenha se mostrado estatisticamente significativa na regressão logística ($p=0,106$), observou-se uma tendência prática de que menores distâncias favoreceram na detecção positiva das vítimas. Essa tendência é consistente com o esperado, dado que a propagação sonora é menos afetada por fenômenos de refração em distâncias menores¹¹. Ademais, os resultados obtidos corroboram estudos anteriores em ambientes similares. Em operações de busca realizadas na Coreia, o uso de sonar de imagem resultou em uma taxa de detecção de 85% para distâncias de até 30 metros. Esse desempenho é bastante semelhante ao observado no presente estudo, que registrou uma taxa de detecção de 82% na mesma faixa de distância, evidenciando a consistência dos resultados obtidos em diferentes contextos operacionais². Logo, o fato da distância não ter alcançado significância estatística indica que outros fatores, como o tempo de operação, o ângulo de varredura e o tipo de objeto, têm um impacto maior sobre os resultados negativos (ausência de detecção).

Essa observação está de acordo com o estudo anterior que destacou a maior eficácia dos sonares em menores distâncias devido a menor influência de fenômenos como refração, reflexão e absorção¹⁹. No entanto, a falta de significância estatística na regressão logística do presente estudo pode ter sido influenciada pela interação dessas variáveis ou por limitações no tamanho da amostra. Isso aponta para a necessidade de estudos adicionais, com uma amostra maior e maior variação nas distâncias, a fim de investigar de forma mais aprofundada o impacto da distância na detecção de vítimas submersas nas praias do Rio de Janeiro.

Um dos grandes obstáculos da busca por um corpo submerso nas praias é que, em sua maioria, sob a ação de fortes correntes marítimas o corpo de uma pessoa afogada pode ser deslocado constantemente. Por consequência, há uma dificuldade em relação à delimitação da área de busca. Assim, infere-se que, como a distância é importante para detecção do corpo pelo sonar,





essa pode ser uma limitação da eficácia nas operações de busca em ambientes costeiros, pois a área de busca pode ser imprecisa, sendo comum a tentativa de identificar corpos que não necessariamente estão próximos ao local estimado de busca.

Os resultados também podem ser compreendidos através da equação do sonar ativo, que relaciona o nível sonoro da fonte, as perdas de transmissão e o nível de ruído ambiente¹². As perdas de transmissão, que aumentam com a distância, explicam por que objetos mais distantes são mais difíceis de detectar, conforme observado na comparação das distâncias registradas entre os resultados positivos e negativos.

O ruído ambiente é um fator crítico que afeta diretamente a operação do sonar, reduzindo a precisão da detecção¹³. Esse ruído pode ser causado por fontes naturais e artificiais, e sua presença se reflete na relação sinal-ruído (SNR), um conceito fundamental que se refere à relação entre a potência do sinal desejado e a potência do ruído de fundo¹². À medida que a distância entre o sonar e o objeto aumenta, o sinal se atenua, reduzindo o SNR e tornando a detecção menos eficaz. Em situações em que o ruído ambiente se comporta como ruído branco, onde todas as frequências estão presentes com a mesma intensidade, o desafio de distinguir o sinal do ruído aumenta, especialmente em distâncias maiores²⁰.

Em praias, é prudente considerar ruídos como o de barcos, motos aquáticas, e até mesmo o som produzido pelas correntes marítimas e ondas, tanto próximo à orla, quanto em encostas de pedras. Esses ruídos de fundo podem interferir nos sinais captados pelo sonar, criando interferências e dificultando distinguir ecos relevantes dos irrelevantes¹². Ainda devemos considerar a complexidade do ambiente de busca, em áreas com muitos obstáculos submersos, como pedras e troncos, o sonar pode captar múltiplos ecos, causando ambiguidade entre um corpo humano e outros objetos.

Para minimizar esse problema existe o filtro casado, usado em sistemas de detecção de sinais como o sonar, para maximizar a relação sinal-ruído (SNR) na detecção de sinais fracos no meio de ruído¹⁹. No contexto de detecção sonar, o filtro casado é aplicado para detectar ecos de pulsos sonoros refletidos por objetos submersos. O funcionamento do filtro casado consiste de emissão de um pulso que pode ter uma forma específica, como um "*chirp*" (um sinal que varia em frequência ao longo do tempo), esse pulso viaja pela água, reflete em objetos submersos e cria um eco que é recepcionado pelo transdutor do sonar¹². Esse eco geralmente é fraco e está misturado aos ruídos de fundo. Assim, o filtro casado correlaciona o eco refletido com a forma do pulso transmitido, ajudando a rejeitar o ruído que não corresponde à forma do pulso transmitido, aumentando a sensibilidade à presença de objetos submersos²¹.

O ângulo de varredura também demonstrou ser um elemento significativo na detecção, com ângulos menores associados a uma maior taxa de sucesso. Estes dados indicam que varreduras





menores e parceladas são mais precisas e eficazes na identificação de corpos, uma vez que objetos próximos ao sensor e à linha central têm maior probabilidade de detecção²².

Neste sentido, ajustes no ângulo de varredura podem ser utilizados de maneira estratégica para aumentar a eficácia do sistema. Este ponto pode ser relacionado ao índice de diretividade do sonar, que se refere à capacidade do sistema de focar a energia acústica em uma direção específica¹². Um alto índice de diretividade pode melhorar a detecção em ângulos menores, alinhando-se com os achados de que ângulos de varredura menores aumentam a taxa de sucesso na identificação de objetos.

O tempo de operação do sonar está diretamente relacionado ao ângulo de varredura, pois ângulos menores exigem menos tempo para cobrir uma determinada área. Com ângulos de varredura reduzidos, a energia do sonar é concentrada em um ponto específico, o que aumenta a eficiência da detecção e, consequentemente, a probabilidade de resultados positivos em um tempo de operação mais curto. No entanto, essa eficiência não invalida a literatura que defende que a permanência prolongada na mesma posição pode aprimorar a detecção¹⁹. Quando o sonar opera em um local específico por um período mais longo, a repetição das emissões sonoras e a análise dos ecos recebidos permitem filtrar ruídos e reverberações indesejadas, resultando em uma detecção mais precisa de objetos¹¹. Assim, embora ângulos de varredura menores tenham um tempo de operação menor, a ampliação desse tempo na mesma posição é igualmente valiosa, pois maximiza a probabilidade de identificação de vítimas, minimizando as interferências provocadas por ruídos e melhorando a clareza dos sinais detectados.

O tempo de operação apresentou uma influência significativa nos resultados de detecção. Isso se dá, possivelmente, porque a duração da operação atenua ou intensifica as interferências provenientes da reverberação. Além disso, a reverberação — definida como o retorno do sinal emitido após reflexões aleatórias das partículas, superfícies e bolhas — constitui um dos principais desafios na detecção subaquática²⁰.

O nível de reverberação impacta diretamente na recepção dos sinais e na capacidade de detecção do sistema sonar, tornando essencial ajustar o tempo de operação para minimizar essas interferências²³. Deste modo, o sonar precisa emitir por algum período, na mesma posição, para que o filtro casado possa realizar a detecção do eco, mesmo em ambientes ruidosos e minimizar essa reverberação indesejada¹⁹. Assim, um aumento no tempo de uso, mesmo que sejam poucos milissegundos, permite que possam aparecer no display indicações mais confiáveis sobre a posição da vítima. Essa relação também pode ser mais bem compreendida por meio da equação do sonar ativo, levando em consideração o excesso de sinal (SE), caracterizado pela diferença entre o nível sonoro do sinal (SL) e a intensidade de ruído total (DI; NL; DT), sendo NL o nível de ruído de fundo¹².



$$SE = (SL - (NL - DI + DT)) - 2TL + TS$$

A detecção bem-sucedida depende de um excesso de sinal positivo, que pode ser comprometido por fatores como a refletividade do alvo (TS), as perdas de transmissão (TL) e o índice de diretividade (DI). Nesse cálculo também é considerado o limiar de detecção (DT), definido como o valor mínimo da SNR que permite a detecção de um sinal com uma probabilidade de 50%, que corresponde à relação sinal-ruído requerida para uma probabilidade de 50%¹². Portanto, ajustar o tempo de operação e o ângulo de varredura pode contribuir para o excesso de sinal positivo e, conseqüentemente, à eficácia do sistema em condições operacionais adversas¹⁹.

Além do excesso de sinal, outro fator que influencia diretamente a eficácia do sistema é a resposta impulsiva, que se refere à forma como o meio de propagação transforma o sinal emitido no sinal recebido¹². O meio subaquático, com suas propriedades variáveis, pode alterar significativamente o sinal ao longo de sua trajetória, afetando a precisão da detecção. O tempo de operação pode minimizar ou aumentar a reverberação, que está diretamente relacionada à otimização da resposta impulsiva do sonar. Essa otimização garante que o sistema consiga distinguir entre o eco verdadeiro e os múltiplos ecos de reverberação, resultando em uma detecção mais precisa, especialmente em ambientes costeiros²⁴.

No geral, a eficácia do sistema parece ser maximizada em distâncias menores, com ângulos de varredura menores e tempos de operação maiores. Apesar dos resultados, é importante considerar as limitações da análise. Esta pesquisa utilizou um conjunto de dados limitado no tempo e no espaço, de modo que o emprego do sonar em condições de mar adversas e em outras praias da cidade, com relevo e temperatura da água diferentes, podem impactar de forma diferente na detecção positiva da vítima. Além disso, a presença de variabilidade nos resultados obtidos neste primeiro experimento de campo sugere que há necessidade de estudos adicionais para explorar plenamente as potencialidades e limitações do sistema.

Embora o experimento tenha demonstrado que menores distâncias e ângulos de varredura mais estreitos aumentam a eficácia da detecção, as operações de salvamento raramente ocorrem em condições ideais. O uso do sonar em ambientes com altos níveis de ruído e distâncias maiores pode comprometer sua precisão, o que destaca a necessidade de treinamento contínuo e estudo aprofundado por parte dos guarda-vidas.

Portanto, apesar de o sonar ser um equipamento de fácil operação, a interpretação dos dados captados exige uma sensibilidade técnica considerável por parte do operador. A eficácia da detecção não depende apenas das configurações do equipamento, mas também do preparo técnico e da experiência do profissional que o manuseia. A capacidade de discernir entre ecos relevantes e interferências ambientais, como reverberações e ruídos de fundo, requer treinamento constante. Além disso, o conhecimento detalhado das características do relevo submarino nas áreas de



operação mais comuns é essencial para a correta interpretação dos sinais. Assim, é fundamental que os grupamentos marítimos invistam em capacitação contínua, tanto para o domínio operacional do sonar quanto para o aprendizado sobre as condições locais de busca, o que certamente impacta a eficácia das operações de resgate.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar o emprego do sonar portátil no apoio aos salvamentos aquáticos, bem como propor recomendações à sua implementação considerando as condições específicas das praias do Rio de Janeiro.

A análise dos resultados indicou que a maior eficácia do sonar está associada a uma relação ideal entre as variáveis analisadas, como a distância do objeto, o ângulo de varredura e o tempo de operação. Verificou-se que a detecção é mais eficiente em distâncias curtas, o que corrobora a menor influência da refração e das perdas de transmissão de sinal, permitindo que o sistema apresente melhor sensibilidade em identificar corpos submersos próximos ao sonar.

Além disso, ângulos de varredura menores demonstraram aumentar significativamente as chances de sucesso na detecção, uma vez que focam a energia acústica em uma área mais restrita e minimizam o impacto de ecos múltiplos e reverberações. Quanto ao tempo de operação, observou-se que durações mais longas podem amplificar interferências, mas, se bem ajustado, esse tempo pode ser otimizado para permitir que o filtro casado atue de forma eficaz, distinguindo o eco real dos ruídos de fundo.

Entretanto, apesar das limitações observadas em ambientes costeiros, onde fatores como correntes marítimas, relevo submarino e ruído ambiente afetam diretamente a operação do sonar, os resultados demonstram que o sonar pode se tornar uma ferramenta de grande valor para o Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro (CBMERJ). Em condições favoráveis — com distâncias curtas, ângulos otimizados e ruído controlado — o sonar mostrou um potencial significativo para apoiar as operações de busca e salvamento. No entanto, em cenários com distâncias maiores e ruído elevado, sua eficácia pode ser reduzida, o que reforça a necessidade de treinamento contínuo e de ajustes operacionais para maximizar o desempenho do equipamento.

Diante dos avanços tecnológicos, é crucial que novas pesquisas explorem outras configurações e tecnologias que possam auxiliar o CBMERJ nas atividades de salvamento. Este estudo fornece uma base preliminar, permitindo a identificação de ajustes técnicos e operacionais que otimizem o uso do sonar portátil, maximizando sua eficácia em condições reais. Além disso, os resultados apresentados podem contribuir para futuras investigações sobre o aprimoramento do uso de sonares em diferentes ambientes aquáticos, expandindo sua aplicabilidade a outras especialidades, como, por exemplo, atividades de mergulho.





Por fim, este trabalho espera contribuir para o conhecimento científico sobre sonares subaquáticos portáteis, oferecendo fundamentos para pesquisas futuras que aprimorem a tecnologia e sua operação. O avanço contínuo nesse campo pode expandir as aplicações desses dispositivos em condições adversas, tornando as atividades mais eficientes e menos arriscadas.

REFERÊNCIAS

1. Secretaria de Estado de Defesa Civil. Boletim da SEDEC/CBMERJ nº 238, 29 dez. 2023. Rio de Janeiro: SEDEC/CBMERJ; 2023.
2. Cho H, Gu J, Joe H, Asada A, Yu SC. Acoustic beam profile-based rapid underwater object detection for an imaging sonar. *J Mar Sci Technol*. 2015;20:180–197.
3. Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro. Manual de salvamento no mar. Rio de Janeiro: CBMERJ; 2019. E-book. ISBN 978-85-68512-11-1.
4. Jalalifar S, Belford A, Erfani E, Razmjou A, Abbassi R, Mohseni-Dargah M, et al. Enhancing water safety: exploring recent technological approaches for drowning detection. *Sensors*. 2024.
5. Santos GGD, Amorim TCA. Afogamento: intervenções e técnicas de suporte à vida: uma revisão integrativa. *Cad Saúde Desenvol*. 2018;12(7):68–84.
6. Szpilman D. Afogamento. *Rev Bras Med Esporte*. 2000;6(4):297–302.
7. Luciano L. Rio tem mais de 400% de aumento de afogamentos em 2024. *Enfoco* [Internet]. 12 jan. 2024 [acesso em 14 mar. 2024]. Disponível em: <https://enfoco.com.br/noticias/cidades/rio-tem-mais-400-de-aumento-de-afogamentos-em-2024-saiba-mais-103797?D=1>
8. Sobrasa. Boletim Brasil 11º – 2024 [Internet]. 2024 [acesso em 12 mar. 2024]. Disponível em: <https://sobrasa.org/afogamento-boletim-epidemiologico-no-brasil-ano-2024-ano-base-de-dados-2022/>
9. Vodasafe Inc. AquaEye: manual de instruções. Canadá: Vodasafe; 2021.
10. Halliday D, Resnick R, Walker J. Fundamentos de física: óptica e física moderna. 9. ed. Vol. 4. Rio de Janeiro: LTC; 2016.
11. Louza FB. As comunicações acústicas para o comando e controle de veículos autônomos submarinos: um comparativo entre o protocolo JANUS (OTAN) e o modem CSUB (MB) [monografia]. Rio de Janeiro: Escola de Guerra Naval; 2023.
12. Rodríguez OC. Fundamentos de acústica submarina. Faro: Universidade do Algarve; 2021.





13. Feynman RP, Leighton RB, Sands M. Lições de física: The Feynman lectures on physics. Vol. 1. Rio de Janeiro: Bookman; 2008.
14. Souza LAL. Princípios de sonar. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas da Marinha; 1997.
15. Lightwire. AquaEye: the first mobile search and rescue sonar with artificial intelligence [Internet]. 2024 [acesso em 21 fev. 2024]. Disponível em: <https://aquaeye-sonar.com/>
16. Lurton X. An introduction to underwater acoustics: principles and applications. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag; 2010.
17. Wenz GM. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources. J Acoust Soc Am. 1962;34(12):1936–1956.
18. Instituto Nacional de Meteorologia. Monitoramento da temperatura da superfície do mar (TSM) [Internet]. Brasília (DF): Instituto Nacional de Meteorologia; [acesso em 20 mar. 2024]. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/servicos/monitoramento-da-temperatura-da-superf%C3%ADcie-do-mar-tsm>
19. Hansen RE. Course material to INF-GEO4310. Oslo: University of Oslo; 2013.
20. Corrêa Junior C. Estudo da propagação acústica no mar na camada de mistura [dissertação]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2008.
21. Westerfield E, Prager R, Stewart J. Processing gains against reverberation (clutter) using matched filters. IEEE Trans Inf Theory. 1960;6(3):342–348.
22. Souza GG, Guimarães OR. Mapeamento de ambiente utilizando sonar embarcado em robô móvel. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 7., 2012, São Luís. Anais. São Luís: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas; 2012.
23. Torres ACL. Modelação da acústica submarina e previsão sonar: desenvolvimento de uma ferramenta de modelação [dissertação]. Portugal: Departamento de Ciências do Mar, Escola Naval; 2019.
24. Souza LAL. Princípios de sonar. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas da Marinha; 1997.