# Revista Pesquisa Nava

Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha

Número 36 - 2024

# REVISTA PESGUJISA NAVAL

NÚMERO 36 - 2024



A Revista Pesquisa Naval tem como missão proporcionar à comunidade científica um canal formal de comunicação e de disseminação da produção técnico-científica nacional, por meio da publicação de artigos originais que sejam resultados de pesquisas científicas e que contribuam para o avanço do conhecimento nas áreas de interesse da Marinha do Brasil (MB). Os artigos aqui publicados não refletem a posição ou a doutrina da MB e são da responsabilidade dos seus autores.

#### PATROCÍNIO

Fundação Conrado Wessel (FCW)

#### **EDITOR-CHEFE**

Almirante de Esquadra Alexandre Rabello de Faria Diretor-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha

#### **EDITORES ADJUNTOS**

Vice-Almirante (EN) Celso Mizutani Koga Diretor do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo – CTMSP Vice-Almirante (RM1) Henrique Renato Baptista de Souza Assessor-Chefe de Relações Institucionais e Comunicação Social – DGDNTM Contra-Almirante (EN) Marcos Fricks Cavalcante Diretor do Centro Tecnológico da Marinha no Rio de Janeiro – CTMRJ

#### **CONSELHO EDITORIAL**

Vice-Almirante (RM1) Alfredo Martins Muradas Assessor de Ciência, Tecnologia e Inovação Vice-Almirante (RM1) Henrique Renato Baptista de Souza Assessor-Chefe de Relações Institucionais e Comunicação Social Capitão de Mar e Guerra José Assunção Chaves Neto Assessor-Adjunto de Comunicação Social Capitão de Mar e Guerra (EN) Vilc Queupe Rufino Assessor-Adjunto de Ciência, Tecnologia e Inovação

#### Capitão de Fragata (T) Virginia Rodrigues Fassarrela Pereira

Encarregada do Núcleo de Inovação Tecnológica Capitão de Fragata Arthur Nadal Neto Assessor-Adjunto de Relações Institucionais Primeiro-Tenente (AA) Alessandro Maia Delfino Encarregado da Divisão de Parcerias Acadêmicas Terceiro-Sargento (ET) Pedro Henrique Alves Coronha Auxiliar da Divisão de Imprensa

#### **COMISSÃO EDITORIAL**

Membros da Comunidade Científica das seguintes Instituições: USP

SENAI-CIMATEC PUC-RIO

#### **EDIÇÃO**

Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha – DGDNTM www.marinha.mil.br/dgdntm/revista

#### **PRODUÇÃO EDITORIAL**

Zeppelini Publishers www.zeppelini.com.br

Revista Pesquisa Naval / Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha v. 1, n. 1, 1988 - São Paulo - SP - Brasil - Marinha do Brasil

Anual Título abreviado: Pesq. Nav. ISSN Impresso 1414-8595 / ISSN Eletrônico 2179-0655

1. Marinha - Periódico - Pesquisa Cientifica. Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha.

CDU 001.891.623/.9 CDD 623.807.2 **SUMÁRIO |** NÚMERO 36 - 2024

#### **PREFÁCIO**

1 DIRETOR-GERAL DE DESENVOLVIMENTO NUCLEAR E TECNOLÓGICO DA MARINHA

Almirante de Esquadra Alexandre Rabello de Faria

#### **MEIO AMBIENTE OPERACIONAL**

3 PERCEPÇÃO PÚBLICA DAS ALGAS MARINHAS E SUAS APLICAÇÕES EM PESQUISA, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO Giselle Pinto de Faria Lopes, Marco Vinicius Ribeiro Lopes,

Thais de Lourdes Macieira

- 11 MAPA DE FLUXO DE ENERGIA DE ONDAS: FERRAMENTA INOVADORA NA AVALIAÇÃO DE ROTAS MARÍTIMAS E MELHORIA DA SEGURANÇA DA NAVEGAÇÃO PARA A INSTALAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS OFFSHORE NA COSTA SUL DO BRASIL Vinícius Santos Pessanha, Rodrigo Tecchio
- 19 USO DA BIOLOGIA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISES GENÔMICAS EM ASCÍDIAS: PROSPECÇÃO DE POTENCIAIS PRODUTORES DE COMPOSTOS BIOATIVOS SULFATADOS NA AMAZÔNIA AZUL

Vanessa de Sousa Rizzo Valente, Vinicius Figueiredo Vizzoni

26 DETECÇÃO DE SUBMARINOS POR MÉTODOS HIDRODINÂMICOS: IDENTIFICAÇÃO E ACOMPANHAMENTO DA ESTEIRA PRODUZIDA POR UM VEÍCULO SUBMERSO EM AMBIENTES NÃO UNIFORMEMENTE ESTRATIFICADOS

Elias de Castro Nadaf

35 A VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DOS CENTROS DE RESSURGÊNCIA E DE SUAS FORÇANTES NA REGIÃO SUDESTE BRASILEIRA

Thiago Silva Baron, Marcos Henrique Maruch Tonelli, Victor Bastos Daher, Afonso de Moraes Paiva

43 PROPAGAÇÃO E ATENUAÇÃO ACÚSTICA NA REGIÃO COSTEIRA DE SEPETIBA/RJ

Yasmin Cristina Bidú dos Anjos, Marcos Tonelli

50 EXPANSÃO DE BASE DE DADOS UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL GENERATIVA COM FOCO EM ALVOS PEQUENOS EM OPERAÇÃO DE BUSCA E SALVAMENTO

Victor André Lima

#### SISTEMAS DE COMANDO E CONTROLE

58 VIGILÂNCIA DA AMAZÔNIA AZUL: APRIMORANDO A CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS NAVAIS COM APRENDIZADO DE MÁQUINA ROBUSTO

Gabriel Custódio Rangel, Luiz Frederico Horácio de Souza de Barros Teixeira, Victor Benicio Ardilha da Silva Alves, Igor Pinheiro de Araújo Costa 64 APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE REALCE DE VOZ E MÁSCARAS ACÚSTICAS PARA APRIMORAMENTO DAS COMUNICAÇÕES POR VOZ NO TELEFONE SUBMARINO

Antônio Walkir Sibanto Caldeira, Rafael Marinati de Barros Martiny, Jefferson Osowsky, Renato Peres Vio

72 EXPLORANDO FORMADORES DE FEIXE ADAPTATIVOS COM O ALGORITMO DE ALOCAÇÃO DE NULOS PARA SUPRESSÃO DE LÓBULOS LATERAIS

Vitor Teixeira Klingelfus, José Antonio Apolinário Jr., Cláudio Augusto Barreto Saunders Filho, Rodrigo Caiado de Lamare

82 APLICAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAIS DE ALTO DESEMPENHO

Felipe Biermann Krusche

#### PLATAFORMAS NAVAIS, AERONAVAIS E DE FUZILEIROS NAVAIS

92 EMPREGO DE REDE NEURAL CONVOLUCIONAL NO **RECONHECIMENTO DE CLASSES DE NAVIOS COM O USO DE** SILHUETAS DE IMAGENS INFRAVERMELHAS

Jorge Amaral Alves, Edgard Braz Alves

100 MÉTODO NUMÉRICO PARA A ESTIMATIVA DE RUÍDO HIDRODINÂMICO APLICADO A UM PROPULSOR DE **SUBMARINO** 

Bruno Pegoraro, Hélio Corrêa da Silva Junior, André Mitsuo Kogishi, Ricardo Sbragio, Alexandre Nicolaos Simos

110 OBTENÇÃO DA RESPOSTA ESTRUTURAL DE MEIOS NAVAIS SUJEITOS A EXPLOSÕES SUBMARINAS

César Augusto Bernardi Werle

#### **NUCLEAR E ENERGIA**

- AVALIAÇÃO DA EVOLUÇÃO DE TENSÕES EM VARETAS DE 116 COMBUSTÍVEL DE LIGA DE ZIRCÔNIO REVESTIDAS COM **CROMO E CARBETO DE SILÍCIO VIA ELEMENTOS FINITOS** Artur Santos Paixão
- 125 O SUBMARINOCONVENCIONALMENTE ARMADO COM PROPULSÃO NUCLEAR BRASILEIRO: ANÁLISE E AVALIAÇÃO, 2012 A 2023

Alexandre Rocha Violante

134 PARTIDA DE UM PEQUENO REATOR MODULAR APÓS DESLIGAMENTO ACIDENTAL: UMA INVESTIGAÇÃO PARA SUBSIDIAR A OPERAÇÃO E O PROJETO DE REATORES **DE PROPULSÃO** 

Rafael Castro Monteiro, Rubens Seishi Wassano

**PREFÁCIO** 



# DIRETOR-GERAL DE DESENVOLVIMENTO NUCLEAR E TECNOLÓGICO DA MARINHA ALMIRANTE DE ESQUADRA ALEXANDRE RABELLO DE FARIA

ciência, a tecnologia e a inovação constituem elementos estratégicos para o fortalecimento da soberania nacional, sobretudo no contexto da defesa, em que o conhecimento científico é instrumentalizado em soluções que atendem aos desafios mais complexos. Nesse sentido, a Marinha do Brasil, em articulação com os principais centros universitários e a indústria e amparada por sua estratégia de ciência, tecnologia e inovação, tem realizado investimentos graduais e estruturados no desenvolvimento de soluções autóctones, promovendo o avanço do conhecimento inovador e de aplicação dual em resposta às demandas relativas ao preparo e ao emprego do poder naval e em benefício da sociedade.

A presente edição da *Revista Pesquisa Naval* reúne um conjunto significativo de contribuições científicas que reafirmam o compromisso dos pesquisadores com a ampliação das fronteiras do conhecimento. Entre os temas abordados, destacam-se o aprimoramento das comunicações por voz no telefone submarino, o uso de inteligência artificial para a melhoria da visão computacional naval e o reconhecimento de classes de navios, bem como investigações relacionadas ao Submarino Nuclear Convencionalmente Armado. Além disso, são apresentados estudos sobre propagação acústica e vigilância da Amazônia Azul aliados a avanços voltados à sustentabilidade, como a análise de rotas marítimas para a instalação de parques eólicos *offshore* e a prospecção de compostos bioativos da biodiversidade marinha por meio de biologia computacional. Esses trabalhos evidenciam a relevância da ciência e da inovação no contexto naval e seu impacto na defesa e no desenvolvimento sustentável.

Ao longo dos anos, a Marinha do Brasil tem alcançado conquistas tecnológicas expressivas, particularmente no escopo de seus programas estratégicos, reafirmando sua posição de relevância na promoção de excelência científica e inovação aplicada. Assim, enaltecem-se as contribuições dos autores que abrilhantam esta edição, ao mesmo tempo que se incentiva a comunidade

#### PREFÁCIO

acadêmica e científica a perseverar em seus esforços, visando ao contínuo aprimoramento tecnológico em benefício da sociedade e da soberania nacional.

Espero que esta edição fomente reflexões críticas e promova o diálogo sobre o papel da ciência naval no fortalecimento da defesa e no desenvolvimento sustentável.

"Soberania pela ciência!"

Ucaude f

ALEXANDRE RABELLO DE FARIA Almirante de Esquadra Diretor-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha

# PERCEPÇÃO PÚBLICA DAS ALGAS MARINHAS E SUAS APLICAÇÕES EM PESQUISA, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO

Public perception of seaweed and its applications in research, development, and innovation

Giselle Pinto de Faria Lopes<sup>1</sup>, Marco Vinicius Ribeiro Lopes<sup>2</sup>, Thais de Lourdes Macieira<sup>3</sup>

Resumo: Este estudo investigou a percepção pública sobre algas marinhas e suas aplicações, identificando barreiras e oportunidades para pesquisa, desenvolvimento e inovação desse recurso. A pesquisa de opinião, realizada com 270 participantes brasileiros, revelou que, embora os benefícios das algas para a saúde e a sustentabilidade sejam amplamente reconhecidos, há uma lacuna significativa no consumo e conhecimento sobre o tema. Os resultados indicam que jovens se mostraram mais inclinados a explorar produtos à base de algas, enquanto adultos e idosos demonstraram menor familiaridade. Além disso, aqueles com pós-graduação demonstraram maior motivação na aquisição desses produtos. O desenvolvimento de produtos alinhados à preferência do público entrevistado pode fundamentar processos em empresas e universidades, além de oferecer à Marinha do Brasil a oportunidade de integrar essas tecnologias em seus objetivos estratégicos, acelerando a inovação em produtos de defesa. Este trabalho reforça a importância da bioeconomia e do desenvolvimento científico e tecnológico, alinhando-se aos objetivos do Plano Estratégico da Marinha do Brasil e promovendo a visibilidade das atividades de Ciência, Tecnologia e Inovação.

Palavras-chave: Algas. Pesquisa. Bioeconomia. Inovação. Bioprodutos.

Abstract: This study investigated public perceptions of seaweed and its applications, aiming to identify barriers and opportunities for research, development, and innovation related to this resource. An opinion poll conducted with 270 Brazilian participants revealed that, although the health and sustainability benefits of seaweed are widely recognized, there remains a significant gap in consumption and knowledge of the subject. The findings indicate that younger individuals were more inclined to explore algae-based products, while adults and the aged demonstrate lower levels of familiarity. In addition, participants with postgraduate degrees were more motivated to buy these products. Developing products preferred by the surveyed population can support processes in companies and universities. It also allows the Brazilian Navy to integrate these technologies into its strategic objectives, thereby accelerating innovation in defense-related products. This work underscores the importance of the bioeconomy and the role of scientific and technological development, aligning with the goals of the Brazilian Navy's Strategic Plan and promoting the visibility of science, technology, and innovation activities.

Keywords: algae, research, bioeconomy, innovation, natural products

<sup>1.</sup> Servidora Civil - Nível Superior. Pesquisadora titular II. Encarregada da Divisão de Bioprodutos do Departamento de Biotecnologia Marinha do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Arraial do Cabo, RJ - Brasil. E-mail: giselle.lopes@marinha.mil.br

<sup>2.</sup> Capitão de fragata. Encarregado da Divisão de Instrumentação Científica do Departamento de Oceanografia do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Arraial do Cabo, RJ - Brasil. E-mail: marco.vinicius@marinha.mil.br

<sup>3.</sup> Analista de projetos do Departamento de Gestão de Produtos e Inovação Corporativa da Financiadora de Estudos e Projetos, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: tmacieira@finep.gov.br

## **1. INTRODUÇÃO**

Para alcançar a Visão de Futuro da Marinha do Brasil, o Plano Estratégico da Marinha (PEM) (BRASIL, 2017), baseado nos objetivos navais, define suas necessidades por meio de Programas Estratégicos. Essa sistemática está alinhada às melhores práticas de governança e gestão de recursos públicos, a fim de contribuir com a eficiência do investimento estatal e o desenvolvimento da área de Defesa. Assim, sete programas estratégicos da Marinha do Brasil (MB) foram estabelecidos.

O Programa Nuclear da Marinha (PNM), por exemplo, além dos objetivos navais que cumpre, apresenta um efeito multiplicador do esforço tecnológico da MB, concretizado pela grande variedade de recursos que poderão ser desenvolvidos e fabricados no país. Com a crescente necessidade de desenvolvimento sustentável do Poder Marítimo, as pesquisas em biotecnologia conseguem agregar atividades de produção de conhecimento de caráter científico-tecnológico nos espacos marítimos e fluviais e, ao mesmo tempo, proporcionam uma capacidade tecnológica e industrial em prol do desenvolvimento nacional. Dessa forma, a busca por combustíveis mais eficientes e sustentáveis, por exemplo, estimula a inovação e favorece, além do setor energético, outras áreas, como a de saúde e agroindústria. O ciclo do combustível, especialmente com a transição para combustíveis mais limpos e renováveis, reduz a emissão de poluentes atmosféricos, melhorando a qualidade do ar e, consequentemente, a saúde pública. Já a produção de biocombustíveis, como o etanol e o biodiesel, pode beneficiar a agricultura ao gerar demanda para culturas específicas, como cana-de-açúcar, soja e microalgas (CAVALCANTE FILHO *et al.*, 2023; SILVA *et al.*, 2023; GAURAV; NEETI; SINGH, 2024) (Figura 1A).

Segundo a Estratégia de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha do Brasil (EMA-415), os projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) são aderentes às áreas temáticas de ciência, tecnologia e inovação (CT&I) e possuem características comuns do ponto de vista de sua aplicação nos setores operativos e de material (BRASIL, 2020). Apesar da linha de pesquisa de bioprospecção da biodiversidade, compreendida na subárea de biotecnologia marinha, estar apenas associada à área temática de meio ambiente operacional, é importante ressaltar que, devido às suas diversas aplicações biotecnológicas, os recursos marinhos estudados atualmente contribuem com outras áreas temáticas, como a nuclear e a de energia, desempenho do combatente, e defesa nuclear, biológica, química e radiológica. As algas marinhas, por exemplo, têm sido um desses recursos estudados pelo seu potencial como fontes de bioativos para biofármacos anticâncer, antídotos, antivirais, antibióticos e como superalimento (FARIA LOPES et al., 2020, 2021, 2023; WAHLSTRÖM et al., 2020; SILVA et al., 2022; CARDOSO et al., 2024) (Figuras 1B-1E).

O potencial biotecnológico das algas marinhas é amplamente estudado na área de ciência e tecnologia (C&T). Entretanto, no processo de pesquisa, desenvolvimento & inovação (PD&I) de biofármacos ou tecnologias de superalimentos *algae-based*, ainda há limitações, principalmente no conhecimento de suas aplicações pelos diferentes públicos (Figuras 1D e 1E).

De acordo com Patankar e Vamma (2023), o mercado de algas marinhas comerciais gerou uma receita de 10 bilhões



**Figura 1.** Diferentes aplicações das algas. (A) Aplicação biotecnológica de PD&I no cultivo de microalgas em biorreator para geração de biocombustíveis. (B) Formulação de suplementos com biomassa nutracêutica de microalgas. (C) Macroalgas como componente principal cotidiano na alimentação oriental. Fonte: Imagens licenciadas sob domínio público em google.com. (D) Bioativo extraído quimicamente de macroalgas com potencial anti-incrustante (GAMA *et al.*, 2008), antineoplásico (PETERS *et al.*, 2018), entre outras aplicações biotecnológicas. Fonte: Imagem obtida de pubchem.ncbi.nlm.nih.gov. (E) PD&I utilizando processo de descelularização de macroalgas para tecnologia de carne cultivada. Fonte: próprio autor.

de dólares em 2022 e deve atingir 12 bilhões de dólares até 2030. Esse crescimento pode ser atribuído a fatores como a crescente demanda por alimentos saudáveis para promover o bem-estar e a saúde em geral, somado ao alto valor nutricional e aos benefícios à saúde, o aumento da adoção de algas marinhas para curativos hidrocolóides e a crescente demanda por esse recurso em indústrias finais como cuidados pessoais, farmacêutica, agricultura, alimentos e bebidas, e ração.

Embora haja um número crescente de estudos que evidenciam os inúmeros benefícios e aplicações das algas marinhas, bem como a tendência de crescimento desse mercado e a mudança no padrão de consumo, com mais consumidores preferindo produtos mais "verdes", as algas marinhas e seus benefícios ainda são amplamente desconhecidos pelo grande público.

Nesse contexto, compreender como os consumidores percebem as algas marinhas é fundamental para que universidades e empresas possam explorar de maneira eficaz esse mercado emergente, criando produtos, aprimorando produtos existentes e criando estratégias de comunicação eficazes atendendo às expectativas e demandas dos consumidores. Identificar as barreiras ao consumo, como falta de familiaridade, sabor ou acesso limitado, é essencial para que empresas e educadores possam desenvolver estratégias para superá-las. Ao mesmo tempo, identificar oportunidades de mercado em segmentos específicos, onde a receptividade às algas marinhas é maior, pode abrir novas frentes de negócios e inspirar a inovação em produtos que atendam às necessidades e preferências desses consumidores. Kamalanon, Chen e Le (2022) exploraram os fatores que influenciam o comportamento de compra de produtos considerados "verdes". A pesquisa revelou que muitos consumidores estão preocupados com questões ambientais e demonstraram interesse em comprar produtos sustentáveis. No entanto, as vendas reais de produtos "verdes" ainda não alcançam o nível esperado. Fatores como uma atitude positiva em relação a produtos sustentáveis, a crença de que ações individuais podem fazer diferença, a preocupação ambiental e a imagem "verde" de uma empresa são importantes para a intenção de compra também. O estudo sugere que profissionais de marketing devem focar em fortalecer essa imagem e aumentar a conscientização ambiental para impulsionar as vendas de produtos sustentáveis.

O desenvolvimento de produtos à base de algas por empresas e universidades não apenas atende à crescente demanda por soluções sustentáveis no mercado civil, mas também oferece um potencial significativo para a MB. Ao fomentar a pesquisa e a inovação nessa área, a Marinha pode usufruir de tecnologias emergentes para alcançar seus objetivos estratégicos. Esse esforço colaborativo pode acelerar a pesquisa aplicada e a inovação em produtos de defesa, elevando-os a níveis de maturidade tecnológica que atendam aos interesses operacionais da MB. Assim, a integração do conhecimento biotecnológico das algas marinhas fortalece não apenas a bioeconomia nacional, mas também contribui para o avanço das capacidades tecnológicas navais, alinhando-se às metas estabelecidas no Plano Estratégico da Marinha e promovendo a soberania e a segurança marítima do país.

Diante do exposto, este estudo utilizou uma pesquisa de opinião pública sobre algas e suas aplicações como ferramenta essencial para identificar a percepção de potenciais consumidores sobre o produto algas marinhas.

#### **2. OBJETIVO**

Elencar as necessidades de um público-alvo diversificado e avaliar sua percepção a respeito do termo "alga marinha", de modo a orientar decisões estratégicas e inovadoras relacionadas à bioeconomia e ao desenvolvimento científico e tecnológico nacional.

#### **3. METODOLOGIA**

A pesquisa de opinião foi conduzida em 2021 e obteve 270 respostas. A proposta foi realizada no início de um projeto de P&D com o objetivo de entender a percepção pública, as aplicações sugeridas, o conhecimento atual, as necessidades e as possibilidades de inovação. Optou-se pela diversificação do público-alvo, considerando adultos brasileiros acima de 18 anos de idade com acesso à internet para preencher o formulário do *Google* (https:// docs.google.com/forms/d/1RLVWRTkySQhLZI8b\_gqjkRpE-D7B03kFhlax4XPdZfOQ/edit#responses) divulgado no perfil pessoal do Instagram dos autores, os quais disponibilizaram o *link* em suas redes de contatos pessoais e profissionais.

O formulário continha 16 perguntas, compreendendo idade, nível de escolaridade, preferência alimentar, tipo de consumidor, percepção imediata do termo "algas marinhas", definição de benefícios descritos pelo público, frequência e motivação para o consumo, e tipos de produtos consumidos.

# **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### 4.1. PERFIL DO PÚBLICO-ALVO

Um total de 270 respostas foram consideradas, compreendendo adultos acima de 18 anos. Os grupos de 18-24 anos e acima de 65 anos constituíram a minoria (6,7%), enquanto o grupo de 36-45 anos (39,6%) apresentou o maior número de respostas. Pós-graduandos representaram 52,2% da população analisada, seguidos por pessoas com ensino superior completo (31,1%), ensino médio (15,6%) e ensino fundamental (1,1%) (Tabela 1). Apenas 6,7% dos participantes apresentaram perfil vegano ou vegetariano. Entretanto, 49,3% relataram não haver consumido nenhum produto contendo algas nos dois meses anteriores à pesquisa, embora 81,8% tenham afirmado que comprariam um produto feito com algas marinhas.

#### 4.2. NUVEM DE PALAVRAS: PERGUNTAS ABERTAS

Para avaliar a percepção inicial do tema sem influenciar os participantes, foram formuladas perguntas abertas sem opções

Tabela 1. Perfil do público-alvo.

ldade (anos)	(%)	Escolaridade	(%)		
18-24	18 (6,7)	Ensino	3 (1,1)		
25-35	62 (23)	Fundamental			
36-45	107 (39,6)	Ensino Médio	42 (15,6)		
46-55	36 (13,3)				
55-65	33 (12,2)	Ensino Superior	84 (31,1)		
> 65	14 (6,7)	Pós-graduação	141 (52,2)		

de resposta pré-definidas. As respostas obtidas foram posteriormente analisadas por meio de uma nuvem de palavras. Inicialmente, foi perguntado: "O que vem à mente quando você pensa em algas marinhas?" As palavras mais recorrentes destacaram temas como "mar", "sushi" e "praia". A elevada frequência de termos relacionados ao ambiente marinho, como "mar" e "praia", pode ser atribuída à associação direta com o termo "algas marinhas", refletindo associações semânticas óbvias. Contudo, a predominância da palavra "sushi" sugere uma conexão menos imediata, mas altamente relevante, com o tema das algas marinhas, indicando um ponto de entrada estratégico para empresas e startups que buscam explorar o potencial comercial desse insumo, mesmo que de forma indireta. Isso inclui a introdução de novos produtos a partir de produtos já conhecidos na área de alimentação (Figura 2A). Em seguida, foi perguntado: "Que benefícios você acredita que algas marinhas possam ter?" As palavras mais destacadas refletem conceitos-chave mencionados, como "vitamina", "muitos" e "saudável", corroborando a associação predominante entre o termo "algas marinhas" e conceitos positivos relacionados à saúde e ao bem-estar. Por outro lado, a expressão "não sei" também foi frequentemente citada, indicando um nível significativo de desconhecimento sobre o tema, o que sugere a necessidade de maior disseminação de informações e conscientização sobre os benefícios e as aplicações das algas marinhas na sociedade (Figura 2B). Por fim, a última questão aberta foi: "Qual produto feito com algas marinhas você comprou, utilizou ou consumiu nos últimos 2 meses?" As palavras relacionadas à comida japonesa aparecem com destaque, evidenciando a associação predominante das algas marinhas com produtos alimentares, com escasso desenvolvimento



**Figura 2.** Nuvem de palavras das questões abertas do formulário. (A) "O que vem à mente quando você pensa em algas marinhas?" (B) "Que benefícios você acredita que algas marinhas possam ter?" (C) "Qual produto feito com algas marinhas você comprou, utilizou ou consumiu nos últimos 2 meses?"

biotecnológico. Apesar de menos frequente, o uso de termos relacionados a cosméticos à base de algas marinhas indica outra área importante de interesse (Figura 2C).

#### 4.3. FAMILIARIDADE COM PRODUTOS À BASE DE ALGAS ENTRE DIFERENTES FAIXAS ETÁRIAS

Os dados obtidos indicam familiaridade com produtos à base de algas, analisada por meio de questões relacionadas à presença ou ausência de aquisição recente e à motivação dessa aquisição devido ao entendimento dos benefícios desses produtos. Entretanto, a Figura 3 demonstra que independentemente da faixa etária, o percentual de pessoas que compraram recentemente produtos à base de algas foi menor em comparação ao percentual de pessoas que acreditam em seus benefícios.

## 4.4. PAPEL NA TOMADA DE DECISÃO DOMÉSTICA E PREFERÊNCIAS POR PRODUTOS DE ALGAS

Os dados demonstraram que, entre os 62% de compradores de produtos à base de algas, 77% percebem benefícios relacionados à saúde e à sustentabilidade, enquanto essa percepção foi semelhante (60%) entre os 16% de não-compradores. Aqueles que se identificaram como consumidores diretos, dependendo do tipo de produto, representaram 22% dos resultados, com 79% de suas aquisições foram motivadas pelos benefícios desses tipos de produto, principalmente para a saúde humana e a preservação ambiental (Figura 4A). Conforme indicado pela nuvem de palavras, a maioria (80%) dos produtos consumidos estava relacionada à alimentação oriental, seguida pela suplementação (10%), como cápsulas à base da cianobactéria *Spirulina* e da alga verde *Chlorella*,



Figura 4. Tomada de decisão na aquisição de produtos à base de algas. (A) Percentual de respostas dos consumidores entrevistados que possuem poder de compra, aqueles que não possuem poder de compra, ou que decidem adquirir produtos específicos à base de algas. (B) Distribuição dos principais tipos de produtos já adquiridos pelos entrevistados.



Figura 3. Familiaridade com produtos à base de algas entre diferentes faixas etárias. A familiaridade foi avaliada com base nas das respostas a três questões do formulário: aquisição recente (até 2 meses), motivação para comprar e crença nos benefícios das algas. As 270 respostas foram normalizadas em valores percentuais e agrupadas em três categorias etárias: jovens (18 a 35 anos), adultos (36 a 55 anos) e idosos (56 anos ou mais).

apresentando um interesse por produtos provenientes do desenvolvimento clássico da biotecnologia marinha. A citação de aquisições recentes de produtos cosméticos e de higiene complementou o perfil do consumidor cotidiano (10%), destacando as preferências pelos produtos e aplicações das algas nas áreas de alimentação, suplementação e cosmética (Figura 4B).

Por outro lado, embora 93% dos entrevistados não sejam veganos ou vegetarianos, as aquisições recentes nos últimos de 2 meses (44%) e a motivação para comprar (56%) tais produtos foram semelhantes às da minoria (7%) de entrevistados veganos ou vegetarianos.

# 4.5. RELAÇÃO ENTRE NÍVEL DE ESCOLARIDADE E CONHECIMENTO SOBRE ALGAS E SEUS BENEFÍCIOS

A respostas indicaram uma diferença entre os consumidores com pós-graduação que acreditam nos benefícios das algas em comparação aos indivíduos com outros níveis de escolaridade e a motivação para a aquisição desses produtos (Figura 5). Esse resultado evidencia que, nesse grau de escolaridade, é alcançada uma maior percepção sobre os estudos biotecnológicos envolvendo esse organismo marinho, bem como maior acesso à divulgação de conceitos e aplicações disponíveis na literatura científica, rotineiramente acessada por mestrandos e doutorandos entrevistados. Por outro lado, os demais grupos do público-alvo, apesar de manifestar interesse, apresentaram menor motivação para adquirir produtos à base de algas, possivelmente devido ao acesso limitado a informações mais detalhadas sobre suas aplicações biotecnológicas.

## 4.6. ASSOCIAÇÃO DO TIPO DE PRODUTO À BASE DE ALGAS COM A FAIXA ETÁRIA E O GRAU DE ESCOLARIDADE

Os tipos de produtos selecionados pelos entrevistados apresentaram uma distribuição de preferências variadas. No entanto, o *ranking* geral das categorias mais citadas foi definido da seguinte forma: cosméticos (74%), pomadas e curativos (70%), vitaminas (69%), medicamentos (62%), uso em culinária (69%) e, com menor percentual de respostas, o uso veterinário (42%). A Tabela 2 apresenta a distribuição das respostas por faixa etária e grau de escolaridade, associando-as a cada tipo de produto citado. Em relação aos cosméticos, pomadas e curativos, vitaminas, medicamentos, e ao uso culinário ou veterinário, foram identificadas diferenças relevantes nos percentuais entre jovens e adultos ou idosos, bem como entre adultos e idosos. Esses produtos foram mais frequentemente mencionados pelos adultos, seguidos pelos jovens e, por último, pelos idosos.



Figura 5. Familiaridade com produtos à base de algas entre os graus de escolaridade. A familiaridade foi avaliada por meio das respostas a três questões do formulário: aquisição recente (até 2 meses), motivação para comprar e crença nos benefícios das algas. As 270 respostas foram normalizadas em valores percentuais e agrupadas de acordo com os níveis de escolaridade: ensino fundamental e médio, superior e pós-graduação.

Giselle Pinto de Faria Lopes, Marco Vinicius Ribeiro Lopes, Thais de Lourdes Macieira

Produtos à base de algas que você compraria?		Faixa etária		Escolaridade			
	Jovens (%)	Adultos (%)	ldosos (%)	Fundamental e médio (%)	Superior (%)	Pós- graduação (%)	
Cosméticos	121 (33)	201 (55)	44 (12)	47 (13)	111 (30)	208 (57)	
Pomadas e curativos	57 (30)	107 (56)	27 (14)	24 (13)	57 (30)	110 (58)	
Vitaminas	61 (33)	100 (54)	24 (13)	22 (12)	53 (29)	110 (60)	
Medicamentos	56 (34)	83 (50)	28 (17)	24 (14)	46 (28)	97 (58)	
Uso culinário	65 (35)	98 (52)	24 (13)	24 (13)	51 (27)	112 (60)	
Uso veterinário	48 (42)	52 (46)	14 (12)	15 (13)	36 (32)	63 (55)	

	Tabela 2. Perfil do	público-alvo e	preferências dos	produtos de alga
--	---------------------	----------------	------------------	------------------

Ao analisar os tipos de produtos em relação ao nível de escolaridade, também foram observadas diferenças importantes entre os percentuais dos jovens e adultos ou idosos e entre adultos e idosos. Esses produtos foram preferidos primeiramente por entrevistados com pós-graduação, seguidos por aqueles com ensino superior, e por último, pelos participantes com ensino fundamental ou médio. Esses dados corroboram com dados anteriores, sugerindo que indivíduos com maior grau de escolaridade têm maior acesso às informações e, em alguns casos, participam diretamente de projetos de pesquisa e desenvolvimento voltados para a inovação desses produtos, o que influencia suas decisões de aquisição.

Por fim, apenas 37% dos entrevistados disponibilizaram contato para maiores informações e demonstraram interesse na pesquisa, sendo 33% jovens, 47% adultos e 20% idosos.

# **5. CONCLUSÃO**

A pesquisa sobre a percepção de adultos brasileiros em relação ao conhecimento e à familiaridade com algas marinhas oferece benefícios para a Marinha do Brasil ao fornecer dados que podem potencializar pesquisas voltadas ao desenvolvimento de bioprodutos derivados de algas, com aplicações diretamente relacionadas à Defesa. O levantamento orienta iniciativas para explorar o uso de algas em áreas como biofármacos, biocombustíveis e biomateriais, contribuindo para a redução de dependência tecnológica e para o desenvolvimento de soluções inovadoras que atendam às necessidades específicas da Marinha. Além disso, os dados obtidos podem embasar parcerias com setores acadêmicos e industriais, ampliando o escopo de projetos voltados à economia do mar e fortalecendo o desenvolvimento de tecnologias adaptadas às demandas operacionais e estratégicas da Defesa.

# REFERÊNCIAS

BRASIL. Comando da Marinha. *Estratégia de ciência, tecnologia e inovação da Marinha do Brasil.* Brasília: Comando da Marinha, 2017. 103 p.

BRASIL. Marinha do Brasil. *Plano Estratégico da Marinha (PEM2040)*. Brasília: Marinha do Brasil, 2020. 88 p.

CARDOSO, N. Q. *et al.* Trends in cell-based seafood: the use of biotechnology for nutrition and sustainability. *In:* SILVA, L. F. da; GUEDES, D. M.; CRUSOÉ, J. M. S. F. (org.). *Agricultural sciences unveiled:* exploring the dynamics of farming and sustainability. São Paulo: Atena, 2024. p. 172-194.

CAVALCANTE FILHO, P. G. *et al.* Socioeconomic impacts of the biodiesel production chain on family agriculture in the Brazilian states of Rio Grande do Sul (RS) and Mato Grosso (MT). *Nova Economia*, v. 33, n. 3, p. 631-658, 2023. https://doi.org/10.1590/0103-6351/7740

FARIA LOPES, G. P. *et al.* Marine bioprospecting: from marine sciences to health sciences investigating new bioactive compounds with antineoplastic potential. *Pesquisa Naval*, p. 1-10, 2020.

FARIA LOPES, G. P. *et al.* In vitro three-dimensional skin development for radiodermatitis, healing, tumorigenesis, and marine bioproduct screening. *Pesquisa Naval*, p. 75-81, 2021. FARIA LOPES, G. P. *et al.* Development of superfood technology based on marine natural products. *Pesquisa Naval*, p. 17-25, 2023.

GAMA, B. A. P. *et al.* Antifouling activity of natural products from Brazilian seaweeds. *Botanica Marina*, v. 51, n. 3, p. 191-201, 2008. https://doi.org/10.1515/BOT.2008.027

GAURAV, K.; NEETI, K.; SINGH, R. Microalgae-based biodiesel production and its challenges and future opportunities: A review. *Green Technologies and Sustainability*, v. 2, n. 1, 100060, 2024. https://doi.org/10.1016/j.grets.2023.100060

KAMALANON, P.; CHEN, J.-S.; LE, T.-T.-Y. Why do we buy green products? An extended theory of the planned behavior model for green product purchase behavior. *Sustainability*, v. 14, n. 2, p. 689, 2022. https://doi.org/10.3390/su14020689

PATANKAR, N.; VAMMA, J. Commercial seaweed market analysis and segment forecast to 2030. *Horizon Grand View Research*, 2023. Disponível em: https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/ commercial-seaweed-market-size/global. Acesso em: 3 set. 2024. PETERS, T. L. *et al.* Target-based screening against eIF4A1 reveals the marine natural product elatol as a novel inhibitor of translation initiation with in vivo antitumor activity. *Clinical Cancer Research*, v. 24, n. 17, p. 4256-4270, 2018. https://doi.org/10.1158/1078-0432. ccr-17-3645

SILVA, F. R. *et al.* Biodiesel in Brazil: an analysis of production, consumption, and prospects in the energy transition. *Research, Society and Development*, v. 12, n. 11, e43121143670, 2023. https://doi. org/10.33448/rsd-v12i11.43670

SILVA, I. V. G. E. *et al.* Crosstalk between biological and chemical diversity with cytotoxic and cytostatic effects of *Aphanothece halophytica* in vitro. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 94, supl. 4, p. 1-15, 2022. https://doi.org/10.1590/0001-3765202220211585

WAHLSTRÖM, N. *et al.* Cellulose from the green macroalgae *Ulva lactuca:* isolation, characterization, optotracing, and production of cellulose nanofibrils. *Cellulose*, v. 27, p. 3707-3725, 2020. https://doi. org/10.1007/s10570-020-03029-5

#### **MEIO AMBIENTE OPERACIONAL**

# MAPA DE FLUXO DE ENERGIA DE ONDAS: FERRAMENTA INOVADORA NA AVALIAÇÃO DE ROTAS MARÍTIMAS E MELHORIA DA SEGURANÇA DA NAVEGAÇÃO PARA A INSTALAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS OFFSHORE NA COSTA SUL DO BRASIL<sup>1</sup>

Wave energy flux map: an innovative tool for maritime routes assessment and enhancing navigation safety for offshore wind farm installation on the south coast of Brazil1

Vinícius Santos Pessanha<sup>1</sup>, Rodrigo Tecchio<sup>2</sup>

Resumo: A crescente procura por licenciamento ambiental para a instalação de parques eólicos offshore no Brasil, especialmente no litoral sul, reflete o crescente interesse na expansão da matriz energética sustentável do país. No entanto, as condições típicas de ondas na região podem impactar os limites operacionais de navios de carga pesada envolvidos na instalação dessas infraestruturas, sobretudo considerando o crescimento registrado de eventos extremos observados. Este estudo analisa as condições de onda ao longo da rota marítima mais utilizada e da futura área de instalação de complexos eólicos offshore na costa sul do Brasil, utilizando o fluxo de energia das ondas  $(P_{u})$  como parâmetro para avaliar a segurança da navegação e a eficiência das operações marítimas. Os resultados indicam que, embora o P<sub>w</sub> geralmente permaneça dentro dos limites operacionais, períodos críticos, especialmente no outono e inverno, apresentam riscos aumentados de exceder esses limites. O mês de maio é identificado como o de maior risco, enquanto os meses de verão são os mais seguros para operações marítimas. O estudo também desenvolveu uma ferramenta inovadora de auxílio à decisão, com mapas de P<sub>w</sub> baseados em previsões de modelos numéricos de onda. As conclusões destacam a importância de analisar os limites operacionais em relação às condições de onda e a versatilidade da ferramenta desenvolvida, destacando seu potencial de impacto, tanto no planejamento e execução de operações offshore quanto em operações navais.

Palavras-chave: Fluxo de energia das ondas. Parques eólicos *offshore*. Rotas marítimas. Limites operacionais.

Abstract: The growing demand for environmental licenses to install offshore wind farms in Brazil, particularly along the south coast, underlines the country's increasing interest in expanding its sustainable energy sources. However, the typical wave conditions along the south coast may affect the operational limits of heavy-lift vessels installing these infrastructures, especially with the recorded increase in extreme events in the region. This study examines the ocean wave conditions along the primary maritime route and the planned installation area of an offshore wind farm complex on the south coast of Brazil, using wave energy flux  $(P_{u})$ as a parameter for assessing navigation safety and maritime operation efficiency. The results suggest that while  $P_{w}$  generally stays within operational limits, specific periods, particularly autumn and winter, pose an elevated risk of exceeding these limits. May is identified as the highest-risk month, while the summer months are the safest for maritime operations. The study also introduces an innovative decision support tool that includes  $P_w$  maps based on wave numerical model forecasts. The conclusions underline the importance of analyzing operational limits concerning wave conditions and the versatility of the developed tool, emphasizing its potential impact on the planning and execution of offshore and naval operations.

**Keywords:** Wave energy flux. Offshore wind farms. Maritime routes. Operational limits.

<sup>1</sup>Os resultados deste artigo fazem parte da monografia apresentada pelo primeiro autor à Escola de Guerra Naval, referente ao Curso Superior (PESSANHA, 2024).

Capitão de Fragata. Hidrógrafo. PhD em Oceanografia Física pela Naval Postgraduate School (Califórnia, Estados Unidos). Encarregado da Divisão de Previsão Numérica do Centro de Hidrografia da Marinha, Niterói, RJ - Brasil. E-mail: vinicius.pessanha@marinha.mil.br

<sup>2.</sup> Capitão de Corveta. Hidrógrafo. Mestre em Meteorologia pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. Encarregado da Seção de Planejamento e Coleta de Dados Oceanográficos do Centro de Hidrografia da Marinha, Niterói, RJ - Brasil. E-mail: tecchio@marinha.mil.br

# **1. INTRODUÇÃO**

As mudanças climáticas têm intensificado eventos meteorológicos extremos e elevado o nível do mar, impactando diretamente a navegação e as atividades econômicas marítimas (GERMOND; MAZARIS, 2019). Segundo Gramcianinov, Hodges e Camargo (2019), na costa sul do Brasil, houve um aumento na frequência, intensidade e duração de eventos extremos de ondas devido à maior atividade ciclônica, o que traz implicações para a gestão costeira e operações marítimas. Assim, para mitigar esses efeitos, torna-se essencial fortalecer a resiliência dos ecossistemas marinhos, aumentar a eficiência do transporte marítimo, além de promover a transição para fontes de energia renováveis, como a energia eólica, que é vital para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e reforçar a segurança energética.

Embora os parques eólicos *onshore* sejam uma tecnologia consolidada, os parques *offshore*, cujo potencial no Brasil supera em até 12 vezes o da área continental (ORTIZ; KAMPEL, 2011), permanecem subexplorados. Entretanto, o crescente número de projetos no Rio Grande do Sul e no Ceará (BRASIL, 2024a) revela desafios expressivos, especialmente no transporte de componentes, incluindo aerogeradores, pás e torres. Esse desafio torna-se ainda mais crítico em condições meteorológicas adversas, que podem comprometer a segurança e a eficiência das operações, evidenciando a necessidade de estudar as rotas marítimas considerando os limites operacionais dos navios em relação às condições de ondas.

Tradicionalmente, a altura significativa das ondas (H) tem sido o principal indicador utilizado pelo Serviço Meteorológico Marinho (SMM) para emitir avisos de ressaca e mau tempo (BRASIL, 2023). No entanto, o fluxo de energia das ondas  $(P_{w})$ , como discutido na seção 3.2, apresenta-se como um parâmetro mais abrangente, integrando tanto H<sub>s</sub> quanto o período de pico das ondas  $(T_p)$ , e oferecendo uma análise mais completa das condições marítimas (TECCHIO, 2024). A utilização do  $P_{w}$  permite avaliar a energia transportada pelas ondas, destacando-se por sua capacidade de representar com maior precisão a intensidade real das ondas (INNOCENTINI; CAETANO; CARVALHO, 2014), sendo potencialmente aplicável para definir os limites operacionais de navios em operações offshore. Os estudos de Araújo et al. (2018) e Tecchio (2024) sugerem a aplicação prática do P<sub>w</sub> na previsão de eventos de ressaca. Porém, nota-se a existência de uma lacuna quanto à aplicação dessa métrica no planejamento de rotas marítimas.

Pesquisas anteriores, como os trabalhos de Acero *et al.* (2016), que propõem uma metodologia para avaliação dos limites operacionais em instalações de turbinas eólicas *offshore*, e de Rathje (2018), que discute os impactos das condições climáticas no transporte marítimo de grande porte, fornecem bases teóricas relevantes. Contudo, ainda são escassos os estudos sobre a otimização do transporte de componentes para parques eólicos *offshore* no Brasil, considerando as condições climáticas específicas do litoral sul.

Neste estudo, analisou-se a rota marítima mais utilizada na costa sul do Brasil, identificada com base em dados de tráfego de navios, bem como uma área selecionada para a instalação de um complexo eólico offshore. Dados históricos de ondas, foram utilizados para caracterizar a área e identificar padrões relevantes. Os limites operacionais dos navios de carga pesada foram avaliados, determinando a adequação da rota para o transporte de aerogeradores e identificando a melhor época do ano para essas operações. Por fim, desenvolveu-se um produto de auxílio à decisão baseado no  $P_{\rm u}$ , integrando variáveis operacionais e ambientais para o planejamento de rotas seguras e eficientes. O foco do estudo está no litoral sul do Brasil, uma região prioritária para a instalação de parques eólicos offshore, analisando dados de ondas de 2001 a 2022. As limitações operacionais são específicas para navios de carga pesada, considerando as restrições de navegação impostas pelas condições de ondas.

#### 2. OBJETIVOS

Este estudo teve como objetivo analisar as condições de onda na área de interesse, considerando os limites operacionais de navios de carga pesada. Paralelamente, busca-se desenvolver um produto de auxílio à decisão baseado no parâmetro  $P_w$  que contribua na avaliação de rotas marítimas destinadas ao transporte de aerogeradores e componentes de parques eólicos *offshore* no litoral sul do Brasil. Dessa forma, pretende-se contribuir para a segurança da navegação e o planejamento eficiente de futuras instalações de parques eólicos, promovendo práticas sustentáveis no desenvolvimento do Poder Marítimo e na expansão da matriz energética limpa do Brasil.

# **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### 3.1. ÁREA DE ESTUDO

Atualmente, mais de 95 projetos aguardam licenciamento ambiental no Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama) para a instalação de complexos eólicos offshore no litoral brasileiro (BRASIL, 2024a). Entre esses, o estado do Rio Grande do Sul lidera com 27 projetos, justificando a escolha do litoral sul do país como área de estudo. Sob a perspectiva da climatologia de ondas, a região sul se destaca por apresentar a maior frequência e intensidade de eventos de ondas altas. Durante o outono e inverno, predominam ondas vindo do sul, com alturas variando entre 2 e 3 m e períodos entre 10 e 12 s; e nas predominantes do nordeste, com alturas entre 1 e 2 m e períodos entre 6 e 8 s (PIANCA; MAZZINI; SIEGLE, 2010). Essas condições representam desafios significativos para a operacionalidade de navios e a segurança da navegação, sobretudo no inverno e durante eventos extremos, reforçando a relevância dessa área para o presente estudo.

A rota marítima considerada (Figura 1) foi determinada a partir de mapas de densidade de tráfego marítimo disponíveis no Portal Brasileiro de Dados Geoespaciais (INDE, 2024). Esses mapas, elaborados pelo Comando de Operações Marítimas e Proteção da Amazônia Azul (COMPAAz), utilizam dados do *Automatic Identification System* (AIS), um sistema de identificação automática de monitoramento de navios que permite identificar as áreas de maior intensidade de tráfego.

A Figura 1a mostra o litoral dos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, além do mapa de densidade de tráfego marítimo, no qual áreas de maior tráfego são indicadas por cores mais escuras. Nessa figura, três pontos principais delimitam a rota marítima de maior intensidade: ponto 1 (25,79° S e 47,13° W), a 64 MN da costa de Paranaguá, PR; ponto 2 (28,51° S e 48,45° W), a 16 MN da costa de Laguna, SC; e ponto 3 (32,33° S e 51,34° W), a 39 MN da costa de Rio Grande, RS. A linha unindo esses pontos forma a rota marítima considerada no estudo, com extensão aproximada de 450 MN, possibilitando a análise dos limites operacionais dos navios durante o transporte de aerogeradores e seus componentes. Além disso, com base nos mapas de projetos em licenciamento



Figura 1. Área de estudo. (a) Mapa de densidade de tráfego marítimo e a rota marítima. (b) Pontos selecionados para análise ao longo da rota e da área RS-19 "Querência".

de complexos eólicos *offshore* (BRASIL, 2024b), foi selecionada a área RS-19, denominada "Querência" (Figura 1b), para possibilitar a análise dos limites operacionais dos navios durante a instalação dos aerogeradores e seus componentes. Essa área tem formato retangular (vértices com latitude e longitude: 32,336° S e 51,322° W; 32,204° S e 51,497° W; 32,518° S e 51,500° W; e 32,385° S e 51,682° W), com área aproximada de 600 km<sup>2</sup> e está localizada a 30 MN da costa de Rio Grande, RS.

#### 3.2. FLUXO DE ENERGIA DE ONDAS E DADOS DE ONDAS

O  $P_{\rm w}$  representa a quantidade de energia que passa pela área de um retângulo teórico ortogonal à direção de propagação da onda, cuja largura é de 1 m e a altura corresponde à profundidade local, a cada segundo, e para águas profundas<sup>1</sup> pode ser calculado como  $P_{\rm w} \approx 0.5 H_{\rm s}^2 T_{\rm p}$ , sendo expresso em kW/m (INNOCENTINI; CAETANO; CARVALHO, 2014). Ou seja, essa grandeza expressa a quantidade de energia transferida pelas ondas, podendo ser utilizado como um parâmetro para caracterizar as ondas oceânicas.

Neste estudo, os dados do *Waverys* (LAW-CHUNE *et al.*, 2021) foram utilizados para caracterizar o padrão das ondas na área de estudo. O *Waverys* oferece uma reanálise global das ondas oceânicas, combinando modelos matemáticos e dados históricos com uma resolução espacial de 1/5° (aproximadamente 20 km) e temporal de 3 horas. Essa combinação permite uma análise deta-lhada dos parâmetros das ondas, como  $H_{\rm s}$  e  $T_{\rm p}$ . A fim de caracterizar o padrão climatológico da área de estudo, foram empregados dados do *Waverys*, no período compreendido entre 1° de janeiro de 2001 a 31 de dezembro de 2022. A região analisada abrange longitudes entre 34° S e 54,8° W e latitudes entre 22° S e 35,8° W, totalizando 7.350 pontos de grade espaçados aproximadamente 20 km entre si (Figura 1). Pessanha (2024) apresenta detalhes sobre a validação dos dados do *Waverys* na área de estudo.

Além dos dados históricos fornecidos pelo *Waverys*, este estudo também considera os prognósticos gerados pelo modelo de ondas WW3 utilizado pelo SMM. O modelo oferece previsões de ondas, com uma resolução espacial de aproximadamente 4 km e previsões horárias para até 5 dias, e desempenha um papel crucial na segurança da navegação e em outras atividades marítimas em águas brasileiras.

#### 3.3. LIMITE OPERACIONAL DE NAVIOS DE CARGA PESADA

A determinação dos limites operacionais de navios desempenha um papel crucial na garantia da segurança e da eficiência no transporte marítimo de cargas pesadas, especialmente sob condições meteorológicas adversas. Esses limites são definidos com base na interação dinâmica entre o navio e as ondas, utilizando parâmetros como  $H_s$  e  $T_p$ , conforme destacado por Acero et al. (2016). Rathje (2018) ressalta a necessidade de uma análise criteriosa das acelerações induzidas pelas ondas durante o transporte de cargas sensíveis, como aerogeradores, sendo que os critérios são mais rigorosos na instalação offshore, pois a instalação é mais sensível à estabilidade. Desta forma, os critérios para instalação exigem condições de mar menos severas, com valores de  $H_s$  e  $T_n$  mais restritos em comparação aos utilizados no transporte (COREWIND PROJECT, 2021). Neste estudo, foram adotados os valores de  $H_s = 4 \text{ m e } T_p = 10 \text{ s como limites}$ operacionais para um navio de carga pesada tipo 183, conforme Rathje (2018). Esses parâmetros resultam em um limite de  $P_{w}$ = 80 kW/m, acima do qual a segurança do transporte estaria comprometida. Para a operação de instalação dos aerogeradores, baseado no estudo de Corewind Project (2021), são adotados limites mais restritos, com  $H_s = 3 \text{ m}$ ,  $T_p = 10 \text{ s e } P_w = 45$ kW/m como referência para uma operação segura.

#### 3.4. DELINEAMENTO DO ESTUDO E PROCEDIMENTOS ADOTADOS

O delineamento deste estudo foi estruturado para analisar as condições de onda ao longo da rota marítima considerada e na área RS-19, conforme descrito na seção 3.1, com base nos limites operacionais de um navio de carga pesada. O foco está na segurança da navegação e na eficiência do transporte de componentes eólicos *offshore*. Para tal, propõe-se que  $P_w$ seja utilizado como indicador do estado do mar para fins de segurança da navegação no transporte e instalação de aerogeradores. Para realizar essa análise, um código escrito em *MATLAB* foi desenvolvido para processar os dados de onda de 7.350 pontos de grade. O código gerou séries temporais de 22 anos com cálculos de  $P_w$  para cada ponto, resultando em oito mapas diários de  $P_w$  ao longo de duas décadas.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Considerando  $P_{\rm w} = (\rho g C_{\rm g} H_{\rm s}^2)/16$  e a aproximação para águas profundas  $C_{\rm g} = gT/4\pi$ , temos que  $P_{\rm w} = (\rho g^2/64\pi) H_{\rm s}^2 T$ , onde  $C_{\rm g}$  é a velocidade de grupo da onda,  $\rho$  denota a densidade da água do mar e g representa a aceleração gravitacional. Dado que  $\rho g^2/64\pi \approx 500 \, [\rm kg/ms^4]$  temos  $P_{\rm w} \approx 0.5 H_{\rm s}^2 T_{\rm p}$ , sendo expresso em [kW/m].

Assim, foram selecionados 51 pontos de grade ao longo da rota marítima e 8 pontos na área RS-19 para uma análise detalhada das condições de onda (Figura 1). Os pontos selecionados estão localizados no entorno da rota e dos limites da área RS-19, com uma distância máxima de 15 km. Com base nos valores de  $P_w$ , a análise caracterizou a costa sul do Brasil, a rota marítima e a área RS-19 quanto à ocorrência de excedência dos limites operacionais estabelecidos ( $P_w = 80$  kW/m para transporte e  $P_w = 45$  kW/m para instalação de aerogeradores). Por fim, foi apresentado um novo produto de auxílio à decisão, que apresenta mapas de  $P_w$  baseados nas previsões de ondas fornecidas pelo modelo WW3, destacando a linha do limite operacional para destacar as áreas onde a navegação é perigosa.

#### **4. RESULTADOS**

## 4.1. FLUXO DE ENERGIA DE ONDAS NA ROTA MARÍTIMA E ÁREA RS-19 "QUERÊNCIA"

A análise da distribuição espacial do  $P_w$  médio ao longo da costa sul do Brasil (Figura 2), com base em dados de 2001 a 2022, indica que os valores de  $P_w$  são menores próximos à costa, permanecendo abaixo de 15 kW/m, e aumentam progressivamente em direção ao mar aberto, especialmente ao sul, onde o  $P_w$  médio supera 30 kW/m. Essa variação indica que as ondas são mais energéticas em áreas afastadas da costa, o que afeta a navegação e a instalação de estruturas offshore. Na rota marítima e na área RS-19 "Querência", o  $P_w$  médio é inferior a 20 kW/m, mas durante os eventos de ondas associadas a condições de mau tempo, os limites operacionais podem ser superados.

A avaliação da série temporal de  $P_w$  nos pontos selecionados ao longo da rota marítima (Figura 3a) e na área RS-19 "Querência" (Figura 3b) revelou o número de ocorrências mensais dos limites operacionais. Para a rota marítima, o mês de maio registrou o maior número de ocorrências, correspondendo a 21,2% do total de excedência nos pontos selecionados,





Figura 2. Fluxo médio de energia de ondas na costa sul do Brasil.

Figura 3. Ocorrência mensal de fluxo de energia de ondas excedendo o limite operacional ao longo da (a) rota marítima e (b) da área RS-19 "Querência", considerando os pontos selecionados.

seguido por agosto (17,5%), enquanto janeiro e março apresentaram as menores ocorrências (0,8 e 2%, respectivamente). Na área RS-19, maio também apresentou a maior ocorrência (16,7%), seguido por setembro (12,2%) e julho (12,1%). As menores ocorrências foram observadas em janeiro, fevereiro e dezembro, com 1,9, 4,1 e 3,9%, respectivamente.

#### 4.2. IMPLICAÇÕES PARA O TRANSPORTE E INSTALAÇÃO DE AEROGERADORES

A análise dos dados considerando os pontos selecionados ao longo da rota marítima indica que o  $P_{\rm w}$  geralmente se mantém dentro do limite operacional, ultrapassando-o em 0,92% do tempo ao longo dos 22 anos considerados. Embora esse percentual seja baixo, o  $P_{w}$  supera o limite operacional em várias ocasiões, especialmente no outono e inverno. Nos pontos mais ao norte, como o ponto 1, o percentual de excedência é menor (0,52%), enquanto no ponto central (ponto 2) o percentual é o mais elevado (1,31%), embora não alcance os valores de  $P_{w}$ mais elevados, que são observados mais ao sul (ponto 3), onde o percentual é de 1,16%. Na área RS-19, ao sul da rota, o P excede o limite operacional em 5,23% do tempo, com os maiores valores também ocorrendo no outono e inverno, refletindo tanto a adoção de um limite operacional menor (45 kW/m) quanto a localização mais ao sul, onde o P<sub>w</sub> alcança maiores valores. Esses resultados indicam que, tanto para a rota quanto para a área RS-19, o risco de excedência aumenta durante o outono e inverno, com maio sendo o mês de maior risco.

A definição do limite operacional impacta significativamente os resultados. A Figura 4a mostra que, entre 2001 e 2022, o número de ocorrências em que  $P_w$  excede o limite é muito maior para 45 kW/m comparado a 80 kW/m. Na Figura 4b, observa-se que o limite de 45 kW/m resulta em um total de 891 dias de excedência, valor muito superior aos 211 dias registrados para o limite de 80 kW/m. Essa diferença está associada aos distintos valores de  $H_s$  adotados como limite: 3 m para 45 kW/m e 4 m para 80 kW/m. Esses resultados destacam a importância de definir cuidadosamente o limite operacional para garantir a segurança das operações.

#### 4.3. FERRAMENTA DE AUXÍLIO À DECISÃO

A análise de  $P_w$  utilizando dados históricos de ondas proporciona uma visão abrangente da distribuição espacial de  $P_w$ , identificando as áreas de maior risco de excedência dos limites operacionais, e compreender melhor quais períodos do ano são mais críticos. No entanto, além dessa análise histórica, é crucial considerar as condições de onda nos dias das operações. Nesse contexto, foi desenvolvido um produto de auxílio à decisão que gera mapas de  $P_w$  baseados nas previsões do modelo WW3 do CHM, destacando as áreas onde a navegação é perigosa em relação aos limites operacionais.



Figura 4. Série temporal do (a) fluxo de energia de ondas e limites operacionais e (b) número de dias com excedência dos limites operacionais.

A Figura 5 ilustra essa ferramenta, apresentando mapas de distribuição de  $P_w$  a cada 8 horas entre 12 de agosto de 2024 às 08Z e 13 de agosto de 2024 às 00Z. A escala de cores varia do azul (menores valores de  $P_w$ ) ao amarelo (maiores valores), com uma linha vermelha destacando o limite operacional de 80 kW/m. Inicialmente (Figura 5a), somente a parte mais ao sul da rota marítima, incluindo o ponto 3, e parte da área RS-19 encontram-se em uma zona de risco, já tendo alcançado o limite operacional. Com o avanço do dia (Figura 5b), a linha se expande progressivamente, colocando a rota e a área RS-19 em zonas de risco (Figura 5c).

A ferramenta de auxílio à decisão, que utiliza previsões de onda do modelo WW3 do SMM, oferece um mapa de  $P_w$  a cada hora com alcance de até 5 dias. Essa capacidade proporciona acesso a informações detalhadas para operadores marítimos e gestores de projetos *offshore*, permitindo uma avaliação dinâmica dos riscos. Essa funcionalidade possibilita rápida adaptação às mudanças nas condições de ondas, melhorando a capacidade de resposta e auxiliando na tomada de decisão.

# **5. CONCLUSÃO**

Este estudo avaliou as condições de onda na rota marítima mais utilizada e na área RS-19 "Querência", na costa sul do Brasil. Os resultados mostram que as áreas ao sul e mais distantes da costa são as mais vulneráveis a condições adversas, ressaltando a necessidade de considerar essas variações no planejamento do transporte e na instalação de aerogeradores eólicos *offshore*. O maior risco de excedência dos limites operacionais ocorre em maio e agosto na rota marítima e em maio, setembro e julho na área RS-19, enquanto os menores riscos foram registrados em janeiro e março na rota marítima, e em janeiro, fevereiro e dezembro na área RS-19.

Além disso, foi apresentada uma ferramenta de auxílio à decisão, que oferece previsões horárias do fluxo de energia de ondas para um período de até 5 dias. Essa ferramenta possibilita uma avaliação detalhada do estado do mar, contribuindo para a segurança da navegação e eficiência das operações. A metodologia empregada, baseada na análise de dados históricos e no fluxo de energia de ondas, mostrou-se eficaz na avaliação de rotas e áreas específicas, com potencial para aplicação em outras regiões. Sua versatilidade permite seu uso tanto por gestores de projetos *offshore* quanto diretamente a bordo de embarcações, podendo também ser integrado a cartas digitais com as devidas adaptações, garantindo um monitoramento contínuo das condições do mar.

A adaptabilidade da ferramenta a diferentes embarcações e cenários operacionais reforça seu caráter inovador, com significativo potencial de impacto no planejamento e execução de operações *offshore*, além de aplicações em operações navais.



**Figura 5.** Ferramenta de auxílio à decisão: Mapas de fluxo de energia de ondas. Ponto 1 (quadrado magenta), ponto 2 (quadrado azul), ponto 3 (quadrado amarelo), linha de limite operacional (linha vermelha), rota marítima (linha preta tracejada) e área RS-19 "Querência" (linha branca).

# REFERÊNCIAS

ACERO, W. G.; LI, L.; GAO, Z.; MOAN, T. Methodology for assessment of the operational limits and operability of marine operations. *Ocean Engineering*, v. 125, p. 308-327, 2016. https://doi.org/10.1016/j. oceaneng.2016.08.015

ARAÚJO, T. A. A.; LÉLLIS, F. S.; CORREIA, F. R. S.; MORENO, D.; SILVA, M. V. Análise de eventos de ressaca na costa brasileira através do fluxo de energia das ondas. *Anais Hidrográficos*, v. 75, p. 161-175, 2018. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/dhn/sites/www.marinha.mil.br.dhn/ files/anais/Anais\_Hidrograficos\_2018\_0.pdf. Acesso em: 9 abr. 2024.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama). *96 projetos de complexos eólicos offshore aguardam regulamentação*. Brasília: IBAMA, 2024a. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/noticias/2024/96projetos-de-complexos-eolicos-offshore-aguardam-regulamentacao. Acesso em: 9 abr. 2024.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama). *Usinas eólicas offshore*. Brasília: IBAMA, 2024b. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/ consultas/arquivos/20240507\_Usinas\_Eolicas\_Offshore.pdf. Acesso em: 26 ago. 2024.

BRASIL. Marinha do Brasil. *Norma da autoridade marítima para atividades de meteorologia marítima (NORMAM-701)*. Brasil: Marinha do Brasil, 2023. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/dhn/sites/ www.marinha.mil.br.dhn/files/normam/NORMAM-701.pdf. Acesso em: 26 ago. 2024.

COREWIND PROJECT. *D4.2 Floating wind O&M strategies assessment*. Relatório técnico. 2021. Disponível em: https://corewind.eu/wp-content/ uploads/files/publications/COREWIND-D4.2-Floating-Wind-O-and-M-Strategies-Assessment.pdf. Acesso em: 20 maio 2024.

GERMOND, B.; MAZARIS, A. D. Climate change and maritime security. *Marine Policy*, v. 99, p. 262-266, 2019. https://doi.org/10.1016/j. marpol.2018.10.010

GRAMCIANINOV, C.; HODGES, K.; DE CAMARGO, R. The properties and genesis environments of South Atlantic cyclones. *Climate Dynamics*, v. 53, p. 4115-4140, 2019. https://doi.org/10.1007/s00382-019-04778-1

INFRAESTRUTURA NACIONAL DE DADOS ESPACIAIS (INDE). Visualizador: MB/COMPAAz - Camada- 2022- Cargueiro (anual). Brasil: INDE, 2024. Disponível em: https://visualizador.inde.gov.br/. Acesso em: 26 ago. 2024.

INNOCENTINI, V.; CAETANO, E.; CARVALHO, J. T. A procedure for operational use of wave hindcasts to identify landfall of heavy swell. *Weather and Forecasting*, v. 29, p. 349-365, 2014. https://doi. org/10.1175/WAF-D-13-00077.1

LAW-CHUNE, S.; AOUF, L.; DALPHINET, A.; LEVIER, B.; DRILLET, Y.; DREVILLON, M. WAVERYS: a CMEMS global wave reanalysis during the altimetry period. *Ocean Dynamics*, v. 71, p. 357-378, 2021. https://doi.org/10.1007/s10236-020-01433-w

ORTIZ, G.; KAMPEL, S. Potencial de energia eólica offshore na margem do Brasil. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA, 5., 2011, Santos. *Anais* [...]. 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/ publication/265894758\_Potencial\_De\_Energia\_Eolica\_Offshore\_ Na\_Margem\_Do\_Brasil. Acesso em: 10 jun. 2024.

PESSANHA, V. S. Mudanças climáticas no contexto do poder marítimo: o impacto das condições de onda na escolha de rotas marítimas e operacionalidade de navios para instalação de parques eólicos offshore no litoral sul do Brasil. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior) - Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, 2024.

PIANCA, C.; MAZZINI, P. L. F.; SIEGLE, E. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. Brazilian Journal of Oceanography, v. 58, n. 1, p. 53-70, 2010. Disponível em: https://www.scielo.br/j/bjoce/a/ QZz4kzgHKSxKT4PdBr3wf5x/?lang=en#. Acesso em: 15 jun. 2024.

RATHJE, H. Weather-restricted sea transports aboard heavy lift ships. In: DUISBURGER KOLLOQUIUM SCHIFFSTECHNIK / MEERESTECHNIK: THE SHIP AND THE OFFSHORE WIND-ENERGY, 36., 2018, Duisburgo, Alemanha. Anais [...]. 2018. Disponível em: https://www.skuld.com/ contentassets/db742b04ac4541ca9e989923c99564a4/weatherrestricted-sea-transports-aboard-heavy-lift-ships.pdf. Acesso em: 10 jun. 2024.

TECCHIO, R. Desenvolvimento de escala de classificação e de ferramentas de previsão de ressacas para a costa S/SE do Brasil, com base no fluxo de energia das ondas. Dissertação (Mestrado em meteorologia) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024. https://doi.org/10.11606/D.14.2024.tde-07052024-115342

# USO DA BIOLOGIA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISES GENÔMICAS EM ASCÍDIAS: PROSPECÇÃO DE POTENCIAIS PRODUTORES DE COMPOSTOS BIOATIVOS SULFATADOS NA AMAZÔNIA AZUL

Computational biology applied to genomic analyses of ascidians: prospecting potential producers of sulfated bioactive compounds in the Blue Amazon

#### Vanessa de Sousa Rizzo Valente<sup>1</sup>, Vinicius Figueiredo Vizzoni<sup>2</sup>

Resumo: Diversas espécies de invertebrados marinhos, como as ascídias, são ricas em polissacarídeos sulfatados que, em estudos anteriores do nosso grupo, foram amplamente caracterizados quanto ao padrão de sulfatação e às respectivas atividades biológicas. Realizou-se, ainda, o sequenciamento dos genomas de duas importantes espécies brasileiras, nos quais foram identificados genes putativos codificantes de enzimas sulfotransferases envolvidas na sulfatação de glicosaminoglicanos, como o dermatam sulfato (DS). Esse dissacarídeo pode ser O-sulfatado no carbono 2 do ácido idurônico e/ou 4 ou 6 da N-acetil galactosamina por enzimas sulfotransferases (STs) espécie-específicas; e rearranjado de diversas formas, combinando-se a proteínas, originando proteoglicanos. Tal diversidade estrutural traduz-se na variedade de propriedades farmacológicas como, por exemplo, cicatrizantes, antitumorais e anticoagulantes. No presente trabalho, foram avaliados os genomas de referência de 15 espécies de ascídias para pesquisa de genes putativos de D-STs, das quais 9 gêneros podem ser encontrados na região correspondente à Amazônia Azul. Todas as sequências foram obtidas de bancos de dados genéticos públicos e, para as análises, foram empregadas ferramentas gratuitas de bioinformática (tBLASTn). Em todas as espécies foram identificados os loci genômicos que codificam as enzimas das três importantes famílias de D-STs, as quais foram agrupadas filogeneticamente em três clados distintos. Os resultados demonstram o enorme potencial de ascídias presentes no mar brasileiro para a produção e prospecção de compostos bioativos sulfatados.

Palavras-chave: Ascídias. Sulfotransferases. Dermatam sulfato. Amazônia Azul®. Abstract: Several species of marine invertebrates, such as ascidians, are rich in sulfated polysaccharides, which have been extensively characterized in previous studies regarding their sulfation pattern and their associated biological activities. The genomes of two important Brazilian ascidian species were sequenced, revealing putative genes encoding sulfotransferase enzymes involved in the sulfation of glycosaminoglycans, such as dermatan sulfate (DS). This disaccharide can undergo O-sulfation at carbon 2 of iduronic acid and/or 4 or 6 of N-acetyl galactosamine through species-specific sulfotransferase enzymes (STs); and rearranged in different ways, combining with proteins, producing proteoglycans. This structural diversity translates into a variety of pharmacological properties, such as healing, antitumor, and anticoagulant effects. In this study, the reference genomes of 15 ascidian species were evaluated for the presence of putative DS-ST genes, with 9 genera identified in the Blue Amazon region. All sequences were obtained from public genetic databases, and free bioinformatics tools (tBLASTn) were used for the analyses. In all species, the genomic *loci* encoding the enzymes of the three important DS-ST families were identified, which were phylogenetically grouped into three distinct clades. The findings highlight the significant potential of ascidians from the Brazilian sea for the production and prospecting of sulfated bioactive compounds.

Keywords: Ascidians. Sulfotransferases. Dermatan sulfate. Blue Amazon®.

Auxiliar da Seção de Biologia Molecular do Instituto de Pesquisas Biomédicas, do Hospital Naval Marcílio Dias, Rio de Janeiro, RJ – Brasil. E-mail: vanessa.rizzo@marinha.mil.br
 Encarregado da Seção de Biologia Molecular do Instituto de Pesquisas Biomédicas, do Hospital Naval Marcílio Dias, Rio de Janeiro, RJ – Brasil. E-mail: figueiredo.vizzoni@marinha.mil.br

# **1. INTRODUÇÃO**

A Amazônia Azul<sup>®</sup> é a região geográfica que abrange a superfície marinha, as águas sobrejacentes ao leito do mar, o solo e o subsolo marinhos pertencentes à extensão atlântica, apresentando projeção desde o litoral até o limite exterior da Plataforma Continental brasileira. Essa área constitui patrimônio nacional, albergando uma grande diversidade de recursos vivos, minerais e sítios ambientais de interesse político-estratégico para o Brasil (BRASIL, 2024).

O ecossistema marinho alberga mais de 80% das espécies vegetais e animais do planeta, além de uma enorme variedade de microrganismos que contribuem para a produção massiva de substâncias encontradas nesse ambiente. Tais organismos são afetados por características naturais dos oceanos (grau de salinidade, temperatura, iluminação, pH, pressão e predadores), que modulam a produção de moléculas bioativas com potencial para aplicações industriais e biotecnológicas de interesse humano (CAPPELLO; NIERI, 2021; GHOSH *et al.*, 2022). Mais de 36.000 compostos já foram isolados de micro- e macrorganismos marinhos, e novos produtos naturais são descobertos a cada ano (BARRECA *et al.*, 2020; GHOSH *et al.*, 2022).

Dentre a fauna marinha de interesse biotecnológico, destacam-se as ascídias, por serem os invertebrados marinhos filogeneticamente mais próximos dos vertebrados (SATOH; ROKHSAR; NISHIKAWA, 2014) e por sua composição rica em polissacarídeos sulfatados (ZHAO; LI, 2016; BENTO et al., 2023). O processo de sulfatação dos resíduos de monossacarídeos, mediado por enzimas sulfotransferases (STs), consiste na transferência de um grupamento sulfato proveniente da 3'-fosfoadenosina 5'- fosfosulfato (PAPS, doador universal de sulfato) para hidroxilas alifáticas ou aromáticas do aceptor, resultando na produção de derivados sulfatados (KUROGI; SUIKO; SAKAKIBARA, 2024). Todas as STs possuem as regiões 5'-fosfosulfato (5'PSB) e ligante 3'-fosfato (3'PB), que apresentam resíduos-chave para a ligação do PAPS (KAKUTA et al., 1998).

Apesar da evolução observada nos processos de busca por novas enzimas, é frequentemente observado que enzimas selvagens não são diretamente aplicáveis na indústria, sendo necessárias modificações para aprimorar sua capacidade catalítica (KAMBLE; SRINIVASAN; SINGH, 2019). Dessa forma, o conhecimento das sequências genéticas possibilita, entre outras estratégias, o desenvolvimento de vetores de expressão em sistemas biológicos que atuem como plataformas para a produção de compostos de interesse. Assim, o cultivo de ascídias em larga escala, como a *Microcosmus exasperatus*, poderia ser desenvolvido para a expressão autóloga ou heteróloga de enzimas STs (BENTO *et al.*, 2023).

Nesse contexto, foi realizado pelo nosso grupo de pesquisa o primeiro sequenciamento dos genomas de duas importantes espécies de ascídias presentes no mar brasileiro (Styela plicata e Phallusia nigra), permitindo a identificação inicial de inúmeros genes codificantes de STs envolvidos na via de síntese de dermatam sulfato (DS) (RIZZO-VALENTE, 2022), um glicosaminoglicano com propriedades farmacológicas reconhecidas e amplamente caracterizadas por meio de ensaios in vitro e in vivo. Estudos recentes demonstraram efeitos terapêuticos antitumoral, anticoagulante, antimicrobiano, neuroprotetor, entre outros (DE SOUSA et al., 2020; BENTO et al., 2023; MEDEIROS et al., 2023). Outro trabalho de nossa autoria evidenciou que o DS extraído de S. plicata possui atividade cicatrizante e capacidade de induzir a neovascularização in vivo, com potencial aplicabilidade na regeneração tecidual (RIZZO-VALENTE et al., 2022).

O DS é formado pela associação dos monossacarídeos ácido idurônico (IdoA) e *N*-acetilgalactosamina (GalNAc), que podem ser *O*-sulfatadas nas seguintes posições: IdoA-GalNAc(4S), IdoA(2S)-GalNAc(6S), IdoA(2S)-GalNAc(4S) e, menos frequentemente, IdoA-GalNAc(4,6S) (SILBERT; SUGUMARAN, 2002; PAVÃO *et al.*, 2014). As variações nas modificações, em função da especificidade e dos níveis de expressão das STs, possibilitam a produção de diferentes compostos que, consequentemente, apresentam atividades biológicas variadas (MISTRY *et al.*, 2024).

#### **2. OBJETIVOS**

Identificar *in silico* as sequências gênicas codificantes das três famílias de dermatam sulfotransferases em todos os genomas de referência da classe Ascidiacea disponíveis na base de dados do *National Center for Biotechnology Information* (NCBI), destacando as espécies encontradas na Amazônia Azul; estimar quais espécies são potencialmente produtoras dos respectivos polissacarídeos sulfatados, identificando possíveis candidatas à prospecção de biocompostos de interesse farmacológico, além de estabelecer as relações filogenéticas e demonstrar os domínios conservados das proteínas.

Com base nos dados obtidos, busca-se contribuir para a promoção do conhecimento e o aproveitamento sustentável dos recursos naturais das áreas marinhas, em conformidade com os Objetivos Estratégicos de Ciência, Tecnologia e Inovação, constantes no PEM 2040 – Planejamento Estratégico da Marinha (BRASIL, 2020).

# **3. METODOLOGIA**

## 3.1. IDENTIFICAÇÃO E FILOGENIA DE GENES CODIFICANTES DE DERMATAM SULFATO EM ASCÍDIAS

Utilizando como base os genes das três famílias de D-STs descritos pela primeira vez na ascídia Ciona intestinalis (TETSUKAWA; NAKAMURA; FUJIWARA, 2010), 22 sequências de transcritos foram obtidas no NCBI para a construção de uma base de dados local. Esses dados serviram como referência para a busca de ortólogos nos genomas representativos (da base RefSeq) de outras 14 espécies de ascídias, utilizando o algoritmo tBLASTn, através do alinhamento entre as sequências de aminoácidos (aa). A partir do resultado do alinhamento obtido pelo referido algoritmo, foram filtradas, para cada espécie representativa estudada, as 10 primeiras sequências com maior valor de identidade. Os algoritmos que compõem a ferramenta Basic Local Alignment Search Tool (BLAST) detectam regiões similares em sequências biológicas, como aquelas formadas por nucleotídeos, componentes básicos do DNA, e aminoácidos, componentes básicos das proteínas. Além disso, atribuem valores de significância estatística para os caracteres em comum entre as sequências comparadas, bem como uma pontuação relacionada à cobertura. Sua aplicação em trabalhos de bioprospecção in silico permite avaliar relações evolutivas e funcionais entre as sequências biológicas, além de identificar membros de uma mesma família gênica (KAMBLE; SRINIVASAN; SINGH, 2019).

Em adição aos resultados do tBLASTn, para verificar a existência de outras dermatam sulfotransferases previamente anotadas, foi realizada uma busca direta no NCBI em cada genoma representativo, utilizando os termos "carboidrato 4 ou 6 sulfotransferase" e "uronil sulfotransferase", correspondentes às famílias D4- e D6-STs; e U2STs, respectivamente. Todas as sequências obtidas, incluindo as do tBLASTn, foram agrupadas em *datasets* de acordo com a sua família (D6ST, D4ST e U2ST), e aquelas redundantes foram eliminadas utilizando o algoritmo disponível na ferramenta SRNAtoolbox (APARICIO-PUERTA *et al.*, 2022).

Nas análises filogenéticas, foi selecionada randomicamente uma sequência de cada dataset para representar cada uma das três famílias de ST em cada espécie estudada. Utilizando o programa MEGA 11, as sequências previamente traduzidas para aa foram alinhadas novamente com o algoritmo ClustalW. Posteriormente, a relação filogenética foi estabelecida com o método estatístico de máxima verossimilhança, com bootstrap de 1.000 (TAMURA; STECHER; KUMAR, 2021). Adicionalmente, para verificar a existência de domínios conservados nas proteínas, os três conjuntos de aa foram alinhados no programa BioEdit 7.2 (HALL, 1999), sendo excluídos da análise os aa que não integravam os motivos conservados. Empregando o MEME Suit 5.5.7 (BAILEY; ELKAN, 1994), os resíduos conservados foram representados, considerando o cálculo de distribuição de frequências de cada aa.

#### **4. RESULTADOS**

Das 20 espécies com genoma representativo disponível no NCBI, 9 gêneros foram relatados na costa brasileira (Figura 1). Entre essas, 15 espécies (*Ascidia mentula, Boltenia villosa, Botrylloides violaceus, Botryllus schlosseri, Ciona intestinalis, Ciona savignyi, Clavelina lepadiformis, Corella eumyota, Diplosoma virens, Halocynthia aurantium, Halocynthia roretzi, Phallusia fumigata, Styela clava, Styela plicata e Trididemnum clinides)* apresentaram sequências gênicas putativas das três famílias de D-STs (Figura 2). Essas sequências foram traduzidas para aa e alinhadas, permitindo a visualização de motivos conservados importantes, tanto para a interação com o PAPS quanto para a estabilização da proteína (Figura 3).



**Figura 1.** Distribuição de ascídias na região da Amazônia Azul. (A) Entre as 15 espécies de ascídias que apresentaram genes referentes às três famílias de dermatam sulfotransferases, 9 gêneros (indicados com asterisco) foram relatados na costa brasileira (LOTUFO, 2002; OLIVEIRA FILHO; LOTUFO, 2015). (B) A ocorrência das espécies *Botryllus schlosseri, Ciona intestinalis e Styela plicata* no litoral brasileiro (indicada por pontos vermelhos) foi confirmada de acordo com dados do Sistema de Informação sobre a Biodiversidade Brasileira (SiBBr, 2024).

# **5. CONCLUSÕES**

A bioprospecção *in silico* mostrou-se uma abordagem eficaz e de baixo custo para mineração de novas moléculas terapêuticas em invertebrados marinhos, permitindo estimar que um grande número de espécies ocorrentes na Amazônia Azul dispõe de maquinaria genômica para a produção de glicosaminoglicanos sulfatados. Além disso, foram desenvolvidas metodologias aplicáveis à análise de identidade entre sequências gênicas, utilizando bancos de dados públicos, como o NCBI, e algoritmos como o BLASTp ou o tBLASTn. A demonstração de regiões conservadas revelou-se uma estratégia eficiente para a comparação e prospecção de proteínas, ao empregar ferramentas como o MEME *Suit*, permitindo identificar outras sequências com motivos similares em bases de dados públicas.



**Figura 2.** Filogenia das dermatam sulfotransferases putativas em ascídias. Distribuição em 3 principais clados correspondentes às famílias D4STs, U2STs e D4STs. Os dados sugerem que as D6STs, cujas sequências aparecem como um grupo externo, são mais primitivas em relação às demais D-STs. As identificações mostram o código do *genbank* seguido pela posição da sequência (início e fim) no *contig* e a espécie correspondente.



Figura 3. Análise das sequências de aminoácidos das proteínas putativas U2ST (1), D4ST (2) e D6ST (3). (1A-3A) Demonstração dos resíduos de aminoácidos conservados correspondentes às regiões 5'-PSB e 3'-PB. As pontas de seta indicam aqueles que interagem com o PAPS, enquanto o traço indica o domínio arginina-aspartato-prolina (RDP), associado à estabilização da proteína. (1B-3B) Distribuição de frequências dos resíduos de aa conservados.

#### REFERÊNCIAS

APARICIO-PUERTA, E. *et al.* sRNAbench and sRNAtoolbox 2022 update: accurate miRNA and sncRNA profiling for model and nonmodel organisms. *Nucleic Acids Research*, Oxford, v. 50, n. W1, p. W710-W717, jul. 2022. https://doi.org/10.1093/nar/gkac363 BAILEY, T. L.; ELKAN, C. Fitting a mixture model by expectation maximization to discover motifs in biopolymers. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS FOR MOLECULAR BIOLOGY, 1994, Menlo Park. *Proceedings* [...]. 1994. v. 2. p. 28-36. BARRECA, M. *et al.* Marine anticancer agents: an overview with a particular focus on their chemical classes. *Marine Drugs*, Basel, v. 18, n. 12, p. 619, dez. 2020. https://doi.org/10.3390/md18120619

BENTO, A. A. *et al.* Extraction, isolation, characterization, and biological activity of sulfated polysaccharides present in ascidian viscera *Microcosmus exasperatus. Pharmaceuticals*, Basel, v. 16, n. 10, p. 1401, out. 2023. https://doi.org/10.3390/ph16101401

BRASIL. Ministério da Defesa. Marinha do Brasil. *Amazônia Azul.* Disponível em: https://www.mar.mil.br/hotsites/amazonia\_azul/ index.html. Acesso em: 2 ago. 2024.

BRASIL. Ministério da Defesa. Marinha do Brasil. Estado-Maior da Armada. *Plano Estratégico da Marinha (PEM 2040)*. Brasília: Marinha do Brasil, 2020. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/sites/all/ modules/pub\_pem\_2040/book.html. Acesso em: 20 ago. 2024.

CAPPELLO, E.; NIERI, P. From life in the sea to the clinic: the marine drugs approved and under clinical trial. *Life*, Basel, v. 11, n. 12, p. 1390, dez. 2021. https://doi.org/10.3390/life11121390

DE SOUSA, G. F. *et al.* Dermatan sulfate obtained from the *Phallusia nigra* marine organism is responsible for antioxidant activity and neuroprotection in the neuroblastoma-2A cell lineage. *International Journal of Biological Macromolecules*, Guildford, v. 164, p. 1099-1111, dez. 2020. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.285

GHOSH, S. *et al.* Novel bioactive compounds from marine sources as a tool for functional food development. *Frontiers in Marine Science*, Lausanne, v. 9, 832957, fev. 2022. https://doi.org/10.3389/ fmars.2022.832957

HALL, T. A. BioEdit: a user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for Windows 95/98/NT. *Nucleic Acids Symposium Series*, Oxford, v. 41, p. 95-98, 1999.

KAKUTA, Y. *et al.* Conserved structural motifs in the sulfotransferase family. *Trends in Biochemical Sciences*, v. 23, n. 4, p. 129-130, abr. 1998. https://doi.org/10.1016/s0968-0004(98)01182-7

KAMBLE, A.; SRINIVASAN, S.; SINGH, H. In-silico bioprospecting: finding better enzymes. *Molecular Biotechnology*, Burlington, v. 61 n. 1, p. 53-59, jan. 2019. https://doi.org/10.1007/s12033-018-0132-1

KUROGI, K.; SUIKO, M.; SAKAKIBARA, Y. Evolution and multiple functions of sulfonation and cytosolic sulfotransferases across species. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, Tóquio, v. 88, n. 4, p. 368-380, mar. 2024. https://doi.org/10.1093/bbb/zbae008

LOTUFO, T. M. C. Ascidiacea (Chordata: Tunicata) do litoral tropical brasileiro. Tese (Doutorado em Zoologia) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Disponível em: https:// www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/41133/tde-21052002-125049/ publico/tmlotufo.pdf. Acesso em: 2 ago. 2024. MEDEIROS, T. B. *et al*. The effect of the sulfation patterns of dermatan and chondroitin sulfate from vertebrates and ascidians on their neuritogenic and neuroprotective properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, Guildford, v. 247, p. 125830, jul. 2023.

MISTRY, R. *et al.* Polysaccharide sulfotransferases: the identification of putative sequences and respective functional characterisation. *Essays in Biochemistry*, Londres, v. 68, n. 4, p. 431-447, maio 2024. https://doi. org/10.1042/ebc20230094

OLIVEIRA FILHO, R. R.; LOTUFO, T. M. Styela cearense n. sp. (Ascidiacea: Styelidae) from the Northeastern Brazilian Coast. *Zootaxa*, Auckland, v. 3981, n. 2, p. 284-290, jul. 2015.

PAVÃO, M. S. G. Glycosaminoglycans analogs from marine invertebrates: structure, biological effects, and potential as new therapeutics. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, Lausanne, v. 4, p. 123, set. 2014. https://doi.org/10.3389/fcimb.2014.00123

RIZZO-VALENTE, V. S. *Genômica comparativa de dermatam sulfotransferases em espécies de ascídias*. Dissertação (Mestrado em Química Biológica) - Instituto de Bioquímica Médica Leopoldo De Meis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

RIZZO-VALENTE, V. S. *et al.* Effects of dermatan sulfate from marine invertebrate *Styela plicata* in the wound healing pathway: a natural resource applied to regenerative therapy. *Marine drugs*, Basel, v. *20*, n. 11, p. 676, out. 2022.

SATOH, N.; ROKHSAR, D.; NISHIKAWA, T. Chordate evolution and the three phylum system. *Biological sciences*, v. 281, n. 1794, p. 20141729, nov. 2014. https://doi.org/10.1098/rspb.2014.1729

SILBERT, J. E.; SUGUMARAN, G. Biosynthesis of chondroitin/ dermatan sulfate. *IUBMB Life*, v. 54, n. 4, p. 177-186, out. 2002. https:// doi.org/10.1080/15216540214923

SISTEMA DA INFORMAÇÃO SOBRE A BIODIVERSIDADE BRASILEIRA (SiBBr). *Portal*. Disponível em: https://sibbr.gov.br/. Acesso em: 2 ago. 2024.

TAMURA, K.; STECHER, G.; KUMAR, S. MEGA 11: molecular evolutionary genetics analysis version 11. *Molecular Biology and Evolution*, Chicago, v. 38, n. 7, p. 3022-3027, jul. 2021. https://doi.org/10.1093/molbev/msab120

TETSUKAWA, A.; NAKAMURA, J; FUJIWARA S. Identification of chondroitin/dermatan sulfotransferases in the protochordate, *Ciona intestinalis. Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, v. 157, n. 2, p. 205-212, 2010. https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2010.06.009

ZHAO, Y.; LI, J. Ascidian bioresources: common and variant chemical compositions and exploitation strategy - examples of *Halocynthia roretzi, Styela plicata, Ascidia* sp. and *Ciona intestinalis. Journal of Biosciences*, v. 71, n. 5-6, p. 165-180, 2016. https://doi.org/10.1515/znc-2016-0012

# DETECÇÃO DE SUBMARINOS POR MÉTODOS HIDRODINÂMICOS: IDENTIFICAÇÃO E ACOMPANHAMENTO DA ESTEIRA PRODUZIDA POR UM VEÍCULO SUBMERSO EM AMBIENTES NÃO UNIFORMEMENTE ESTRATIFICADOS\*

Submarine detection by hydrodynamic methods: recognition and tracking of the wake generated by a submerged vehicle in non-uniformly stratified environments

#### Elias de Castro Nadaf<sup>1</sup>

Resumo: Com o avanço da tecnologia na construção de submarinos velozes e silenciosos, os métodos tradicionais de deteccão tornaram-se limitados. Nesse contexto, pesquisas para o desenvolvimento de métodos hidrodinâmicos de detecção, utilizando o sinal da esteira gerada por veículos submersos, protagonizaram uma alternativa às limitações. Contudo, investigações do comportamento das esteiras, até o momento, consideraram-nas imersas em um ambiente uniformemente estratificado, não representando a estrutura complexa dos oceanos. Assim, este estudo visa a investigar técnicas de detecção de submarinos por meios hidrodinâmicos, observando o comportamento de esteiras produzidas por uma esfera que se propaga com velocidade constante em um fluido não uniformemente estratificado. As pesquisas consistem em uma série de simulações numéricas de alta resolução nas quais a estratificação do fluido é sistematicamente variada. Foram considerados um perfil de densidade linear e três não lineares. A análise das assinaturas microestruturais mostra que a esteira assume formatos distintos dependendo do tipo de anomalia na estratificação, e as ondas internas são muito mais intensas em fluidos não uniformemente estratificados, sendo os experimentos realizados com perturbações do tipo gaussiana caracterizados por uma distribuição de energia verticalmente assimétrica. Utilizando taxas de decaimento da Abstract: With the development in building fast and silent submarines, traditional detection methods have become limited. In this context, research into the development of hydrodynamic detection methods, using the wake signal generated by submerged vehicles, provided an alternative to the limitations. However, investigations into the behavior of the wakes have considered them to be immersed in a uniformly stratified environment, which does not represent the complexity of the oceans. Therefore, this study aimed to investigate submarine detection techniques using hydrodynamic means, observing the behavior of wakes produced by a sphere propagating with constant speed in a non-uniformly stratified fluid. The research consists of a series of high-resolution numerical simulations in which the fluid stratification is systematically varied. One linear and three non-linear density profiles were designed for this purpose. The analysis of microstructural signatures shows that the wake takes on different shapes depending on the type of anomaly in the stratification, and internal waves are much more intense in non-uniformly stratified fluids, with experiments being carried out with Gaussian-type perturbations characterized by a vertically asymmetric energy distribution. Using microstructure decay rates, the endurance of the wakes was found, showing that signals in profiles with stratification

\*Os resultados deste estudo foram publicados na revista científica *Physics of Fluids*. Disponível em https://doi.org/10.1063/5.0108064.
 1. Capitão de Corveta. Hidrógrafo. Mestre em Meteorologia e Oceanografia Física pela Naval Postgraduate School (Califórnia, EUA). Encarregado da Divisão de Oceanografia Operacional do Centro de Hidrografia da Marinha - Niterói, RJ - Brasil. E-mail: nadaf@marinha.mil.br

microestrutura, encontrou-se o período de persistência das esteiras, mostrando que os sinais em perfis com anomalias na estratificação podem persistir aproximadamente o dobro do tempo quando comparados aos perfis lineares. Perfis de gradiente alto são os mais persistentes, enquanto gradientes locais fracos podem reduzir substancialmente a longevidade da esteira, resultando em diferenças em um fator de três ou mais. Os resultados mostram que mesmo anomalias pequenas e espacialmente localizadas na estratificação podem influenciar profundamente a dinâmica, a estrutura, a evolução e persistência da esteira.

Palavras-chave: Esteiras. Fluido não uniformemente estratificado. Modelagem numérica de alta resolução. Taxa de decaimento de microestruturas. Período de persistência da esteira. Detecção de submarinos. anomalies can persist approximately twice as long when compared to linear profiles. High gradient profiles are the most persistent, while weak local gradients may have the wake longevity reduced, resulting in differences by a factor of three or more. The results show that even small, spatially localized anomalies in the stratification can profoundly affect the dynamics, structure, evolution and endurance of wakes.

Keywords: Wakes. Non-uniformly stratified fluid. High-resolution numerical modeling. Microstructure decay rate. Persistence period of the wake. Submarine detection.

# 1. INTRODUÇÃO

A inexistência de meios capazes de combinar discrição e alcance satisfatório para a detecção de submarinos no cenário atual tem impulsionado pesquisas para o desenvolvimento de métodos hidrodinâmicos para a identificação e acompanhamento de veículos submersos. Com a construção de submarinos extremamente silenciosos e rápidos, os tradicionais métodos acústicos e magnéticos de detecção, unicamente utilizados há muitos anos para este fim, tornam-se cada vez mais limitados. Como qualquer corpo em movimento no oceano gera, inevitavelmente, um rastro de turbulência, chamado de esteira, uma alternativa é utilizar a assinatura dessa esteira para o rastreamento e subsequente detecção de um submarino (SPEDDING; BROWAND; FINCHAM, 1996; RADKO; LEWIS, 2019). Ao contrário das esteiras produzidas por navios que navegam na superfície, as esteiras geradas no interior do oceano são muito mais persistentes em razão da maior estabilidade entre as camadas estratificadas. De acordo com Spedding (1997), a esteira produzida por um corpo submerso pode persistir por 12 dias e ainda ser detectável. Dessa maneira, as investigações relacionadas às características e dinâmica das esteiras tornaram-se um foco de estudo para o campo operacional, visando ao desenvolvimento de algoritmos para a localização de submarinos no interior do complexo ambiente marinho.

Em ambientes estratificados, como o oceano, as características das esteiras são normalmente descritas em termos de sua dependência do número de Reynolds (*Re*) e do número de Froude (*Fr*) do fluxo. O *Re* descreve a importância das forças advectivas em relação às forças viscosas, sendo definido como Equação 1:

$$Re = \frac{UD}{v},\tag{1}$$

Em que: *U*: a velocidade do corpo; *D*: o diâmetro do corpo; *v*: a viscosidade cinemática do fluido.

Quando  $Re < 2 \times 10^3$ , o fluxo é inteiramente laminar, porém quando  $Re > 4 \times 10^3$  a esteira se torna totalmente turbulenta. Em ambos os regimes, vórtices de grande escala são criados ao longo da trajetória do corpo (PAO; ROBERT; CHARLES, 1982). O número de Froude representa a relação entre as forças advectivas e de empuxo, sendo descrito pela Equação 2:

$$Fr = \frac{U}{ND},\tag{2}$$

Em que:

*N*: a frequência de Brunt-Väisäla, frequência característica das ondas internas.

A frequência de Brunt-Väisäla em fluidos incompressíveis é definida como Equação 3: (3)

$$N = \sqrt{\frac{-g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}},$$

Em que: g: a aceleração gravitacional.  $\rho_0$ : a densidade de referência.  $\rho$ : a densidade.

## **2. OBJETIVOS**

Os padrões de esteiras em ambientes estratificados foram estudados usando experimentos em tanques de laboratórios (MEUNIER; SPEDDING, 2004; VOROPAYEV et al., 2007), simulações (DIAMESSIS; SPEDDING; DOMARADZKI, 2011; MOODY et al., 2017) e modelos analíticos (MEUNIER; DIAMESSIS; SPEDDING, 2006; NEGRETTI et al., 2006). Contudo, até o momento, os estudos concentraram-se na dinâmica das esteiras em um ambiente uniformemente estratificado, o que raramente ocorre na natureza, particularmente no contexto oceanográfico. Assim, o objetivo deste trabalho foi investigar os efeitos de perturbações não lineares na estratificação do ambiente e seus impactos na morfologia, assinatura das microestruturas, detecção e persistência da esteira produzida por um corpo submerso em movimento, por meio de simulações numéricas em diferentes cenários de anomalias na estratificação do fluido.

# **3. METODOLOGIA**

#### **3.1. MODELAGEM NUMÉRICA**

Neste trabalho, foram realizadas uma série de simulações numéricas nas quais o corpo submerso (esfera) de diâmetro, D = 10 m, desloca-se com velocidade constante, U = 0.05 m/s, através de um fluido estacionário. Foi adotado o modelo incompressível de Boussinesq de um componente, ignorando-se a rotação planetária e as não linearidades da equação de estado. As equações governantes do modelo são Equações 4, 5, 6 e 7:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = \frac{-1}{\rho_0} \nabla p + g \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \hat{k} + v \nabla^2 u, \qquad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T = k \nabla^2 T, \tag{5}$$

$$\nabla \cdot u = 0, \tag{6}$$

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = -\alpha_T (T - T_0), \tag{7}$$

Em que:

u = (u, v, w): o vetor velocidade total;

 $\hat{k}$ : o vetor unitário vertical;

*p*: a pressão;

*T*: a temperatura da água do mar;

 $T_0$ : uma temperatura de referência, que é definida como a temperatura da superfície.

As constantes restantes são o coeficiente de expansão térmica,  $\alpha_{\rm T}$ , a aceleração gravitacional, g, a viscosidade cinemática, v, a difusividade térmica, k, e a densidade de referência,  $\rho_0$ , definida como a densidade na superfície. O número de Prandtl, Pr, definido como a razão entre a viscosidade cinemática e a difusividade térmica, Pr = v/k, é unitário, valor comumente empregado em modelos de sistemas turbulentos (e.g., DE STADLER, 2013).

#### 3.2. CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

O domínio computacional tem dimensões de  $60 \times 10 \times 12.5$ nas direções *x*, *y* e *z*, respectivamente. Os eixos *x* (longitudinal), *y* (transversal), e *z* (vertical) representam, respectivamente, as direções no sentido do comprimento, largura e profundidade do domínio. O corpo viaja ao longo do eixo *x* saindo do ponto de origem [0,0,0], localizado a cinco unidades de comprimento dos limites superior, lateral e - *x* até *x* = 50. As dimensões mencionadas foram normalizadas pelo diâmetro do corpo, tornando-os números adimensionais e proporcionais às dimensões do objeto. As investigações dos efeitos das anomalias na esteira têm como base dois padrões gerais de estratificação. O primeiro assume o perfil de temperatura inicial dado pela Equação 8:

$$\overline{T}(z) = z + \gamma exp\left(\frac{-z^2}{\sigma^2}\right),\tag{8}$$

Em que:

y: a variável responsável por controlar a magnitude da perturbação da temperatura local;

 $\sigma$  por determinar sua escala vertical.

O segundo padrão é expresso pela Equação 9:

28

Elias de Castro Nadaf

$$\overline{T}(z) = z + \beta tanh\left(\frac{z}{\delta}\right),\tag{9}$$

Em que:

 $\beta$  e  $\delta$  determinam o gradiente local e o tamanho da área perturbada, respectivamente. São considerados oito casos específicos, conforme valores das variáveis exibidos na Tabela 1. A primeira simulação, EXP 1A, é pautada em um perfil de estratificação linear, sendo uma referência para simulações não lineares subsequentes. Em EXP 2A, o perfil linear inicial é modificado pela adição de uma perturbação gaussiana, conforme a Equação 8. Em EXP 3A e EXP 4A, a expressão que define a estratificação é descrita pela Equação 9. EXP 3A (EXP 4A) tem alto (baixo) gradiente de temperatura local em z = 0, mas o mesmo gradiente que EXP 1A nas áreas mais acima e abaixo dessa região. Os experimentos acima mencionados assumem Fr = 1. As simulações EXP 1B – EXP 4B são os experimentos equivalentes realizados com  $Fr = \sqrt{10} \approx 3.2$ . Em todas as simulações deste estudo, assume-se que  $Re = 5 \times 10^3$ . Os perfis de temperatura que regem a estratificação de fundo do ambiente e as anomalias não lineares são ilustrados na Figura 1.

## **4. RESULTADOS**

A intensidade da microestrutura induzida pela esteira foi quantificada usando as taxas de dissipação da energia cinética e térmica. A taxa de dissipação da energia cinética é definida como Equação 10.

$$\varepsilon^* = \upsilon (\nabla u')^2, \tag{10}$$

Tabela 1. Resumo das simulações.

Fr = 1.0	γ	β	σ	δ	Fr = 3.2	γ	β	σ	δ	Observações
EXP 1A	0	-	-	-	EXP 1B	0	-	-	-	Estratificação linear
EXP 2A	2	-	2	-	EXP 2B	0.2	-	0.2	-	Perturbação gaussiana
EXP 3A	-	1	-	0.2	EXP 3B	-	0.1	-	0.02	Alto gradiente
EXP 4A	-	1	-	1.1	EXP 4B	-	0.1	-	0.11	Baixo gradiente



Figura 1. Perfis de temperatura característicos utilizados nas simulações: (A) EXP 1A,B e 2A,B, e (B) EXP 3A,B e 4A,B.

Em que:

u': o desvio de velocidade em uma média horizontal local.

O equivalente adimensional é Equação 11.

$$\varepsilon = Re^{-1} (\nabla u')^2. \tag{11}$$

A taxa de dissipação térmica é definida como Equação 12.

$$\chi^* = 2k(\nabla T')^2, \tag{12}$$

e seu equivalente adimensional é Equação 13.

$$\chi = 2Pr^{-1}Re^{-1}(\nabla T')^2.$$
(13)

Essas quantidades são bastante utilizadas como métricas para estimar a intensidade de estruturas turbulentas em pequena escala. Não obstante, as taxas de dissipação ( $\varepsilon e \chi$ ) podem variar de forma independente e exibir padrões de distribuição diferentes (GREGG et al., 2018). As análises dessas quantidades foram restritas a um subconjunto do domínio 20 < x < 30, região que está distante das posições inicial e final do objeto, onde são esperadas características de esteira transitória. O registro temporal dessas observações é expresso em termos da quantidade adimensional Nt, em que t é o tempo decorrido desde o início do deslocamento até a passagem do objeto por um determinado plano normal ao eixo x, e N é a frequência de flutuabilidade do sistema, conforme definido anteriormente. Essa escala permite a correta representação da esteira gerada pelo objeto em determinado instante.

Na Figura 2 são plotadas as médias dos valores de  $\chi$ , tomadas no plano y - z, para os experimentos linearmente estratificados e com perturbação gaussiana, quando Nt = 25. Nesse momento, o núcleo turbulento da esteira já se dissipou consideravelmente e as ondas internas radiadas pela esteira são mais pronunciadas. Particularmente, as ondas internas são irradiadas assimetricamente nos casos com perturbação gaussiana, favorecendo a propagação pela camada de frequência de alta flutuabilidade (parte inferior) da perturbação.

A Figura 3 mostra as médias dos valores de  $\chi$ , tomadas no plano y - z, para EXP 3B e 4B (casos com alto e baixo gradientes locais, respectivamente), quando Nt = 25. Os experimentos com Fr = 1 (EXP 3A e 4A) comportam-se de forma semelhante e, por isso, não foram apresentados. No caso de alto gradiente local, o aumento da estratificação na profundidade em que está o objeto restringe os deslocamentos verticais, e a esteira permanece confinada à profundidade do corpo. Este elevado gradiente de temperatura também resulta em fortes variações locais nas perturbações de temperatura, levando a uma grande dissipação térmica. Em contraste, o caso de baixo gradiente é caracterizado pela expansão vertical da esteira e baixa dissipação térmica em toda a região de baixo gradiente. As ondas internas irradiadas no caso de alto gradiente local são mais fracas do que na simulação de perfil linearmente estratificado, mas comparáveis àquelas na simulação de baixo gradiente. Este resultado é consistente com um padrão notório na Figura 3: ondas internas podem se propagar facilmente de regiões de baixa frequência de flutuabilidade local para altas frequências de flutuabilidade local, mas o oposto é raro.

A Figura 4 mostra o registro temporal dos máximos de  $\chi$  e  $\varepsilon$  para todas as simulações. Foi definido o máximo local para determinada quantidade como Equação 14:

$$f_{max}(x,t) = \max[f(x,y,z,t)]_{yz},$$
(14)

Em que:

o sinal máximo é obtido somente no plano y - z.

Em seguida, os resultados foram agrupados por Nt e foi calculada a média das máximas de cada grupo no intervalo 20 < x < 30. Em todos os casos, a dissipação da energia cinética atinge o seu valor máximo logo após a passagem do corpo, contudo a taxa de dissipação da energia cinética diminui gradualmente à medida que a esteira se espalha. A mistura induzida pela turbulência induz mudanças locais na perturbação da temperatura, fazendo com que a taxa de dissipação térmica aumente gradualmente até Nt = 2, quando os efeitos da flutuabilidade se tornam proeminentes e a esteira começa a colapsar. Os padrões da taxa de dissipação da energia cinética são muito próximos em todos os casos, embora a taxa de decaimento seja ligeiramente mais rápida para Fr = 3.2, mostrando que este parâmetro não é sensível a mudanças notáveis com perturbações locais na estratificação. No entanto, a taxa de dissipação térmica apresenta variações substanciais. Embora nenhuma mudança considerável seja aparente para o caso com perturbação gaussiana, os casos de baixo e alto gradientes mostram que as taxas de dissipação térmica são


**Figura 2.** Seções transversais da dissipação térmica ( $\chi$ ) no plano y-z para sistemas linearmente estratificados (EXP 1A,B) e com perturbação gaussiana (EXP 2A,B), quando Nt = 25: (A) EXP 1A, (B) EXP 2A, (C) EXP 1B, (D) EXP 2B.



**Figura 3.** As seções transversais de  $\chi$  no plano y-z para EXP 3B e EXP 4B, quando Nt = 25, são ilustrados em (A) e (B), respectivamente.



**Figura 4.** As taxas de dissipação térmica,  $\chi$ , são plotadas como função do tempo nos painéis (A) para Fr = 1.0, e (B) para Fr = 3.2. Os registros correspondentes das taxas de dissipação da energia cinética,  $\varepsilon$ , são ilustrados nos painéis (C) para Fr = 1.0, e (D) para Fr = 3.2. As linhas pontilhadas representam os limites mínimos de detecção.

bem abaixo e acima do caso linear, respectivamente. As escalas de tempo de decaimento do sinal são comparáveis, demonstrando que as regiões com estratificação localmente elevada são capazes de manter esteiras substancialmente mais duradouras. Na Figura 4, são também exibidos os limites mínimos teóricos de detecção do sinal da esteira,  $\chi_{cr} = 10^{-8} C^2/s$  e  $\varepsilon_{cr} = 10^{-8} W/kg$  (e.g., WATERHOUSE et al., 2014). Foram usados os valores de *D*,  $U e \partial T/\partial z$  como escalas nominais na conversão desses limites em unidades adimensionais.

Neste trabalho, as medições das taxas de dissipação da energia cinética e térmica foram utilizadas para determinar a taxa de decaimento e o tempo de duração útil para a detecção da esteira. A taxa de decaimento é calculada ajustando as taxas de dissipação para cada simulação às Equações 15 e 16:

$$\varepsilon = C_{\varepsilon} (Nt)^{\lambda_{\varepsilon}},\tag{15}$$

$$\chi = C_{\chi} (Nt)^{\lambda_{\chi}},\tag{16}$$

#### Elias de Castro Nadaf

	λχ	D <sub>χ</sub> (min)	ΝDχ	λε	D₀(min)	NDε	Cd
EXP 1A	-1.68	356.5	356.5	-1.67	28.3	28.3	0.012
EXP 2A	-1.57	475.9	475.9	-1.80	21.6	21.6	0.012
EXP 3A	-2.14	595.0	595.0	-1.55	31.6	31.6	0.012
EXP 4A	-1.50	189.8	189.8	-2.26	20.9	20.9	0.012
EXP 1B	-2.12	136.1	51.0	-1.88	21.3	6.6	0.012
EXP 2B	-1.61	114.5	35.8	-1.43	22.3	7.0	0.013
EXP 3B	-2.48	205.8	64.3	-1.68	19.9	6.2	0.012
EXP 4B	-1.79	53.1	16.6	-2.01	23.4	7.3	0.011

Tabela 2. Taxa de decaimento, tempo máximo de detecção (em minutos e adimensional) e	e coeficiente de a	arrasto.
--------------------------------------------------------------------------------------	--------------------	----------

Em que:

 $(C_{\varepsilon}, C_{\chi})$  e  $(\lambda_{\varepsilon}, \lambda_{\chi})$ : os parâmetros de ajuste.

Especialmente,  $(\lambda_e, \lambda_\chi)$  representam as taxas de decaimento da dissipação de energia cinética e térmica, e são estimadas com base em Nt > 1 e Nt > 4, respectivamente. Essas faixas correspondem aos intervalos de decaimento algébrico bem definidos. A exceção foi em EXP 4A — que sofre um atraso substancial ao atingir a dissipação térmica máxima e, por essa razão, foi limitada à análise na faixa de N > 10. As taxas de decaimento da energia cinética medidas para todas as simulações têm valores comparáveis e são similares à previsão de Spedding (1997), que encontrou uma lei de potência -7/3 para esteiras estratificadas em seus estágios iniciais. Foi observado que o decaimento da energia cinética em si não está intimamente relacionado à estrutura da estratificação, segundo os resultados apresentados por Lewin e Caulfield (2021).

Na Tabela 2 são apresentados os valores de  $\lambda_{\varepsilon}$  e  $\lambda_{\chi}$ , bem como  $D_{\varepsilon}$  e  $D_{\chi}$ , que representam os intervalos de tempo em que cada parâmetro,  $\varepsilon$  e  $\chi$ , respectivamente, está acima de  $\varepsilon_{cr}$ e  $\chi_{cr}$ , ou seja, é susceptível de ser detectado. As assinaturas da esteira observadas com base em  $\varepsilon$  duram normalmente entre seis e 30 unidades de tempo e possuem pouca sensibilidade à estratificação de fundo. No entanto, a dissipação térmica apresenta variações substanciais na duração da esteira. As perturbações na estratificação podem resultar em diferenças em um fator de aproximadamente dois na duração da esteira em relação à simulação linearmente estratificada. Não obstante, os casos de alto gradiente (EXP 3A,B) são caracterizados por maiores períodos de persistência da esteira, e os casos de baixo gradiente (EXP 4A,B), os mais curtos, resultam em diferenças em um fator de três ou mais no tempo de persistência.

# **5. CONCLUSÃO**

Neste trabalho, foram realizadas simulações numéricas do escoamento que passa por uma esfera imersa em um fluido, e foi analisada a sensibilidade da esteira produzida às mudanças na estratificação. A taxa de dissipação da energia cinética ( $\varepsilon$ ) exibe sensibilidade muito limitada à estratificação, e seus padrões de decaimento são consistentes com aqueles previstos por Spedding (1997). A persistência do sinal de microestrutura térmica varia consideravelmente com a anomalia na estratificação, podendo ser aproximadamente o dobro quando comparado ao caso linear, e perfis com anomalias de alto gradiente persistem mais que os perfis de baixo gradiente em um fator de três ou mais. Os experimentos mostraram que, em sistemas não uniformemente estratificados, as ondas internas são mais intensas, sendo os resultados consistentes com Brucker e Sarkar (2010).

Os resultados demonstraram que, para caracterizar corretamente a assinatura hidrodinâmica de submarinos em ambientes oceânicos genuínos, é necessário levar em consideração a distribuição real da estratificação do fluido, em contraste aos cenários idealizados de estratificação uniforme amplamente empregados em estudos anteriores. As simulações mostraram que as anomalias na estratificação afetam profundamente a dinâmica, a distribuição espacial, a intensidade e a durabilidade da esteira. Além disso, os dados obtidos corroboram a viabilidade do método hidrodinâmico, um enorme avanço capaz de superar as limitações dos métodos convencionais. Essa inovação tem potencial de impulsionar a indústria de defesa, contribuindo para o desenvolvimento de sensores capazes de detectar a assinatura da esteira de submarinos, o que pode ter um impacto substancial na Guerra Naval, especialmente na Guerra Antissubmarino.

# REFERÊNCIAS

BRUCKER, K.; SARKAR, S. A comparative study of self-propelled and towed wakes in a stratified fluid. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 652, p. 373-404, 2010. https://doi.org/10.1017/S0022112010000236

DE STADLER, M. *High resolution simulation of the turbulent wake behind a sphere in a stratified fluid.* PhD Dissertation, Department of Engineering Science, University of California, San Diego, 2013.

DIAMESSIS, P. J.; SPEDDING, G. R.; DOMARADZKI, J. A. Similarity scaling and vorticity structure in high-Reynolds-number stably stratified turbulent wakes. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 671, p. 52-95, 2011. https://doi.org/10.1017/S0022112010005549

GREGG, M. C.; D'ASARO, E. A.; RILEY, J. J.; KUNZE, E. Mixing efficiency in the ocean. *Annual Review of Marine Science*, v. 10, p. 443-473, 2018. https://doi.org/10.1146/annurev-marine-121916-063643

LEWIN, S. F.; CAULFIELD, C. P. (2021). The influence of far field stratification on shear-induced turbulent mixing. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 928, A20, 2021. https://doi.org/10.1017/jfm.2021.755

MEUNIER, P.; DIAMESSIS, P. J.; SPEDDING, G. R. Self-preservation in stratified momentum Wakes. *Physics of Fluids*, v. 18, p. 106601, 2006. https://doi.org/10.1063/1.2361294

MEUNIER, P.; SPEDDING, G. R. A loss of memory in stratified momentum wakes. *Physics of Fluids*, v. 16, p. 298-305, 2004. https://doi.org/10.1063/1.1630053

MOODY, Z.; MERRIAM, C.; RADKO, T.; JOSEPH, J. On the structure of stratified wakes generated by submerged propagating objects. *Journal of Operational Oceanography*, v. 10, p. 191-204, 2017. https://doi.org/10.1080/1755876X.2017.1307801

NEGRETTI, M. E.; VIGNOLI, G.; TUBINO, M.; BROCCHINI, M. On shallow-water wakes: an analytical study. *Journal Fluid Mechanics*, v. 567, p. 457-475, 2006. https://doi.org/10.1017/S0022112006002436

PAO, H. P.; ROBERT, Y. L.; CHARLES, E. S. Vortex trails in stratified fluids. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, v. 3, p. 12-18, 1982.

RADKO, T.; LEWIS, D. The age of a wake. *Physics of Fluids*, v. 31, 076601, 2019. https://doi.org/10.1063/1.5100969

SPEDDING, G. R. The evolution of initially turbulent bluff-body wakes at high internal Froude number. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 337, p. 283-301, 1997. https://doi.org/10.1017/S0022112096004557

SPEDDING, G. R.; BROWAND, F.; FINCHAM, A. M. The long-time evolution of the initially turbulent wake of a sphere in a stable stratification. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, v. 23, p. 171-182, 1996. https://doi.org/10.1016/0377-0265(95)00414-9

WATERHOUSE, A. F.; MACKINNON, J. A.; NASH, J. D.; ALFORD, M. H.; KUNZE, E.; SIMMONS, H. L.; POLZIN, K. L.; ST. LAURENT, L. C.; SUN, O. M.; PINKEL, R.; TALLEY, L. D.; WHALEN, C. B.; HUUSSEN, T. N.; CARTER, G. S.; FER, I.; WATERMAN, S.; NAVEIRA GARABATO, A. C.; SANFORD, T. B.; LEE, C. M. Global patterns of diapycnal mixing from measurements of the turbulent dissipation rate. *Journal of Physical Oceanography*, v. 44, n. 7, p. 1854-1872, 2014. https://doi.org/10.1175/ JPO-D-13-0104.1

VOROPAYEV, S. I.; FERNANDO, H. J. S.; SMIRNOV, S. A.; MORISSON, R. On surface signatures generated by submerged momentum sources. *Physics of Fluids*, v. 19, 076603, 2007. https://doi. org/10.1063/1.2749713

# A VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DOS CENTROS DE RESSURGÊNCIA E DE SUAS FORÇANTES NA REGIÃO SUDESTE BRASILEIRA

The spatial and temporal variability of upwelling centers and their drivers in the Brazilian southeast region

## Thiago Silva Baron<sup>1</sup>, Marcos Henrique Maruch Tonelli<sup>2</sup>, Victor Bastos Daher<sup>3</sup>, Afonso de Moraes Paiva<sup>4</sup>

**Resumo:** Este trabalho investiga a contribuição da Corrente do Brasil como impulsionadora da ressurgência na região sudeste brasileira, onde se constatou que as forçantes atmosféricas, isoladamente, não são suficientes para explicar as variações no afloramento da Água Central do Atlântico Sul (ACAS), especialmente na ressurgência de Cabo Frio. Para tanto, foram analisados 10 anos de resultados da base hidrodinâmica LSE24, uma reanálise oceânica desenvolvida pela equipe do Laboratório de Oceanografia Física (LOF/COPPE) da UFRJ, utilizando simulações com o modelo HYCOM, no escopo da Rede de Modelagem e Observações Oceanográfica. Por meio da análise de Funções Ortogonais Empíricas, foram encontradas evidências de que a variação da intensidade do fluxo da Corrente do Brasil, sobre a plataforma continental, atua como forçante da ressurgência na região sudeste como um todo.

Palavras-chave: Ressurgência. Cabo Frio. Intrusão da Corrente do Brasil.

Abstract: This study investigated the contribution of the Brazil Current as an upwelling driver in the southeastern Brazilian region, where atmospheric drivers alone are not able to fully explain the variations in the upwelling of South Atlantic Central Water (SACW), particularly in the Cabo Frio upwelling system. For this purpose, 10 years of data from the LSE24 database were analyzed. This reanalysis, developed by the Physical Oceanography Laboratory (LOF/COPPE) of UFRJ, employed simulations with HYCOM, within the scope of Oceanographic Modeling and Observation Network. Empirical Orthogonal Functions analyses indicate that variations in Brazil Current flow intensity over the continental shelf play a significant role in driving upwelling across the entire southeastern region.

Keywords: Upwelling. Cabo Frio. Brazil Current Encroachment.

1. Capitão de Corveta (EN). Mestre em Engenharia Oceânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Ajudante da Divisão de Oceanografia Física do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Rio de Janeiro - RJ, Brasil. E-mail: thiago.baron@marinha.mil.br

2. Capitão de Corveta (RM3-T). Doutor em Oceanografia Física pela Universidade de São Paulo. Encarregado da Divisão de Oceanografia Física do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Rio de Janeiro - RJ, Brasil. E-mail: marcos.tonelli@marinha.mil.br

3. Capitão de Corveta (RM3-EN). Doutor em Engenharia Oceânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Ajudante da Divisão de Oceanografia Física do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Rio de Janeiro - RJ, Brasil. E-mail: victor.daher@marinha.mil.br

4. Doutor em Meteorology and Physical Oceanography pela University of Miami. Coordenador do Laboratório de Oceanografia Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Brasil. E-mail: afonso@oceanica.ufrj.br

# **1. INTRODUÇÃO**

A ressurgência é caracterizada como o movimento ascendente com duração e extensão mínimas necessárias para que a massa d'água mais profunda seja trazida para a camada superficial do oceano (SMITH, 1968). Uma vez que essas águas são ricas em nutrientes, seu transporte em direção à superfície contribui para o aumento da atividade biológica. De fato, importantes zonas pesqueiras ao redor do mundo estão localizadas em regiões de ressurgência (BOWDEN, 1983). Outra consequência relevante desse fenômeno é a mudança na estrutura termohalina, que influencia a acústica submarina. Essa mudança pode atuar como uma barreira à propagação sonora, impossibilitando a detecção de alvos submarinos (CODATO et al., 2011).

As bordas leste dos oceanos são as principais regiões onde ocorre a ressurgência costeira, como no caso das Correntes das Canárias, de Benguela, da Califórnia e do Peru (SMITH, 1968; BOWDEN, 1983). Entretanto, esse fenômeno também pode ser observado nas bordas oeste, como acontece no litoral brasileiro, que apresenta três regiões típicas de incidência: o sul da Bahia, o Cabo de Santa Marta e a região sudeste (KÄMPF; CHAPMAN, 2016). Nesta última, destacam-se os centros de ressurgência localizados ao longo do litoral do Espírito Santo, no Cabo de São Tomé e em Cabo Frio (DE CASTRO et al., 2006).

A ressurgência em Cabo Frio despertou o interesse de diversos pesquisadores, como Allard (1955), Emílsson (1961), Ikeda, de Miranda e Rock (1974), entre outros, que atribuíram à predominância de ventos de Nordeste sua principal forçante. Nesse caso, a tensão de cisalhamento do vento é responsável por criar uma divergência costeira devido ao transporte de Ekman ao largo da costa, o que, por continuidade, impõe um fluxo vertical ascendente das águas mais profundas. Essa massa d'água mais fria que aflora na região é a Água Central do Atlântico Sul (ACAS), que apresenta temperaturas entre 6 e 20°C e salinidade entre 34,6 e 36,2 (MIRANDA, 1985; DE CASTRO et al., 2006). Durante a ressurgência em Cabo Frio, são observadas temperaturas de até 13°C na superfície (CALIL ELIAS, 2009).

Embora exista uma boa correlação entre os gradientes de temperatura, resultantes do afloramento das águas profundas, e o campo de vento, outros fatores também contribuem para a ocorrência da ressurgência. Entre eles, destacam-se a configuração da linha de costa e a batimetria, conforme apontado por Rodrigues e Lorenzzetti (2001). Além disso, a atividade de mesoescala da Corrente de Contorno Oeste (CCO) pode exercer grande influência nesse processo. Meandros e vórtices ciclônicos da Corrente do Brasil (CB) facilitam a penetração da ACAS em regiões mais rasas da plataforma continental, pré-condicionando a massa d'água de modo que mesmo um campo de tensão do vento mais fraco seja suficiente para desencadear a ressurgência (CAMPOS; GONÇALVES; IKEDA, 1995; CAMPOS; VELHOTE; DA SILVEIRA, 2000; CASTELAO; CAMPOS; MILLER, 2004; CALADO et al., 2010; PALÓCZY et al., 2014). Outro mecanismo da CCO que favorece a ressurgência é a intrusão da corrente na plataforma continental, o que pode gerar um transporte onshore na camada limite de fundo (OKE; MIDDLETON, 2001; ROUGHAN; MIDDLETON, 2002). Na costa leste da Austrália, Oke e Middleton (2000) e Roughan e Middleton (2002) verificaram que a aproximação da corrente, intensificada pela topografia, promove maiores eventos de ressurgência devido ao aumento da tensão de fundo, o que, consequentemente, gera um transporte cross-shore ao longo da camada limite. Roughan e Middleton (2004) e Schaeffer, Roughan e Wood (2014) também encontraram evidências de que a variabilidade da intensidade da Corrente Leste da Austrália na plataforma continental desempenha um papel preponderante como forçante da ressurgência, igualmente em razão do aumento do transporte na camada limite de fundo.

Outro aspecto relevante da ressurgência é sua variabilidade interanual. Na região de Cabo Frio, com base em pouco mais de 20 anos de medições da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) realizadas pela Companhia Nacional de Álcalis na praia Grande, em Arraial do Cabo, Calil Elias (2009) identificou três modos distintos de variabilidade interanual: intensidade, interrupção efetiva do período de não ocorrência e diferenças nos meses de início e término. O autor verificou que, nos períodos de 1974-1975, 1981-1982 e 1989-1990, o processo de ressurgência foi menos expressivo, enquanto nos períodos de 1971, 1977-1978 e 1983-1984, ela apareceu de forma mais pronunciada, com médias de temperatura mais baixas. Ao analisar as forçantes atmosféricas, Calil Elias (2009) constatou que elas não foram suficientes para explicar toda a variabilidade interanual observada na ressurgência de Cabo Frio. Esse aspecto ressalta a complexidade do fenômeno e aponta para a influência de outros fatores em sua ocorrência.

## 2. OBJETIVO

Considerando a lacuna observada por Calil Elias (2009), este estudo teve como objetivo investigar os principais modos de variabilidade da TSM na região sudeste brasileira, com o intuito de identificar o padrão associado à ressurgência e os modos associados às suas forçantes. Dessa forma, pretendeu--se verificar se, assim como na região da Corrente Leste da Austrália, a Corrente do Brasil desempenha um papel relevante como forçante da ressurgência na região.

## **3. METODOLOGIA**

Este trabalho foi realizado com base em uma reanálise de 10 anos (2006-2015) desenvolvida no Laboratório de Oceanografia Física (LOF/COPPE/UFRJ). A reanálise foi fundamentada em simulações realizadas com o modelo hidrodinâmico Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM), no âmbito da Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica (REMO) (LIMA et al., 2013; FRANZ et al., 2021). A configuração do modelo apresenta discretização vertical em 32 camadas σ2 híbridas (coordenadas isopicnais, sigma e geopotenciais) e resolução horizontal de 1/24°, permitindo representar fenômenos de larga e mesoescala no oceano, interações entre águas oceânicas e de plataforma continental, além de, em função das forçantes nos contornos, efeitos em escala sinótica e oscilações relacionadas à maré astronômica (PAIVA et al., 2019). A validação dos resultados do HYCOM, apresentada em Paiva et al. (2019), utilizou diversos dados, incluindo: velocidade de corrente do PN-BOIA, fundeios NAT01 e NAT02 do INCT PRO-OCEANO, séries de temperatura da água do programa PIRATA, trajetórias de derivadores de superfície do Programa GDP, seções de XBT do "High Density XBT Transects" da NOAA, altimetria da AVISO, TSM do OSTIA, perfis climatológicos de T e S do WOA13, climatologia de profundidade de camada de mistura do IFREMER e de dados maregráficos costeiros do GLOSS.

Para identificar os principais modos de variabilidade da TSM, da corrente e do campo de tensão do vento, foi utilizada a análise de funções ortogonais empíricas (*Empirical Orthogonal Function* – EOF), amplamente empregada nas geociências (HANNACHI, 2004). Foram analisadas médias diárias dos campos de velocidade e temperatura, calculadas com base nos resultados do modelo, salvos a cada 3h. O mesmo foi feito para os campos de vento, oriundos do *Modern Era Retrospective analysis for Research and Applications* da NASA (MERRA 2 — https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2) (GELARO et al., 2017), utilizados como forçante do modelo.

## **4. RESULTADOS**

As séries temporais dos mínimos de TSM nos três centros de ressurgência do litoral sudeste (Figura 1a) indicam que, de modo geral, a ressurgência de Cabo Frio é a que apresenta as menores temperaturas, seguida por Cabo de São Tomé e Espírito Santo (Figura 1b). Esse resultado está de acordo com o trabalho de De Castro et al. (2006), que, por meio de dados de sensoriamento remoto, observaram temperaturas mínimas de 15, 17 e 18°C para as ressurgências de Cabo Frio, Cabo de São Tomé e Vitória, respectivamente.

As análises de EOF sugerem que os dois primeiros modos de variabilidade espacial e temporal da TSM na plataforma continental (EOF1 e EOF 2) explicam ~88% da variância, considerando 3.652 campos diários (*i.e.*, 10 anos de dados) no domínio analisado (Figuras 2 e 3). O padrão espaço-temporal do primeiro modo (EOF1) evidencia sua associação com o ciclo sazonal de aquecimento e resfriamento que ocorre durante o verão e o inverno (Figura 2). Esse modo está em fase na maior parte do domínio, apresentando variações positivas da TSM no verão e negativas no inverno.

O segundo modo (EOF2) (Figura 3) explica 6,2% da variância dos dados e exibe uma diferença de fase mais pronunciada. De modo geral, durante a primavera e o verão, ocorrem variações positivas de temperatura em regiões situadas a oeste da longitude 44°W e variações negativas em regiões a leste. Os centros de ressurgência de Cabo Frio e do Cabo de São Tomé apresentam as maiores amplitudes de variação de temperatura, sugerindo que esse padrão espacial esteja associado ao fenômeno da ressurgência. Além disso, constatou-se que as extensões das plumas com as maiores amplitudes de variação (azul escuro e roxo) são da mesma ordem de grandeza das extensões médias das plumas de ressurgência descritas por De Castro et al. (2006): ~100 km para Cabo Frio e ~60 km para Cabo de São Tomé. Na região do Espírito Santo, não é observado um centro de ressurgência bem definido, indicando uma maior variabilidade na posição de ascensão das plumas, o que está de acordo com as observações de Martins (2015).



**Figura 1.** (a) Instantâneo da TSM com a localização dos centros de ressurgência (retângulos vermelhos) e as isóbatas de 50m e 150m (em preto). (b) Série temporal do mínimo de TSM para as regiões de Cabo Frio (CF), Cabo de São Tomé (CST) e Espírito Santo (ES).



**Figura 2.** (a) Padrão espacial do primeiro modo da TSM (EOF1). Em preto, estão marcadas as isóbatas de 50 e 150 m. (b) Série temporal da componente principal.



**Figura 3.** (a) Padrão espacial do segundo modo da TSM (EOF2). Em preto, estão marcadas as isóbatas de 50 e 150 m. (b) Série temporal da componente principal.



Figura 4. Séries temporais normalizadas pelo desvio padrão da componente principal da EOF2 (Figura 3b) e do mínimo de TSM para cada centro de ressurgência avaliado (Figura 1b) e os respectivos coeficientes de correlação.

Os elevados coeficientes de correlação entre a componente principal da EOF2 da TSM (Figura 4) e as séries temporais de mínima TSM em cada centro de ressurgência (Figura 1) evidenciam que o segundo modo de variabilidade da TSM (Figura 3) é capaz de representar as áreas de ressurgência na região sudeste do Brasil. Cabe ressaltar que os ventos predominantes na região analisada são provenientes do quadrante N-E (DE CASTRO et al., 2006; Calil Elias, 2009), sendo o eixo NE-SW aquele com maiores ocorrências (CALIL ELIAS, 2009). Devido a essa característica, antes da realização da análise de EOF, o campo de tensão do vento foi rotacionado dos eixos N-S e E-W para os eixos NE-SW e NW-SE, sendo utilizada apenas a componente NE-SW. Dessa forma, os valores positivos observados na série da componente principal (Figura 5b) correspondem aos ventos de NE, i.e., favoráveis à ressurgência, enquanto os valores negativos estão associados aos ventos de SW, decorrentes da passagem de sistemas frontais, que inibem o estabelecimento da ressurgência (DE CASTRO et al., 2006). Na região analisada, ocorrem de 3 a 6 passagens de sistemas frontais por mês, com menor frequência no verão e maior frequência no inverno (DE CASTRO et al., 2006). Como esperado, a componente principal da EOF1 do vento (Figura 5b) apresenta maior frequência de passagens frontais durante o outono e inverno, enquanto, na primavera e no verão, predomina a ocorrência de ventos favoráveis à ressurgência.



Figura 5. (a) Padrão espacial do primeiro modo de variabilidade da tensão de cisalhamento do vento rotacionada para o eixo NE-SW. Em preto, estão marcadas as isóbatas de 50 e 150 m. (b) Série temporal da componente principal.

A EOF1 do rotacional do campo de tensão do vento (Figura 6) explica 28% da variância dos dados e apresenta duas fases distintas: uma próxima à costa, representada por cores frias, e outra ao largo da quebra da plataforma, representada por cores quentes. Os valores positivos da componente principal favorecem a ocorrência da ressurgência. As maiores amplitudes da EOF1 concentram-se na região de Cabo Frio, o que está de acordo com o trabalho de Castelao e Barth (2006), que identificaram o rotacional do campo de tensão do vento como a principal forçante da ressurgência nessa região, comparado com o Cabo de São Tomé e Vitória. Como esperado, observa-se a predominância de valores favoráveis à ocorrência da ressurgência próximo à costa durante a primavera e o verão. Conforme constatado por Lorenzzetti et al. (2009), o primeiro modo de variabilidade do campo de intensidade das correntes (Figura 7) evidencia a dominância do sinal sazonal sobre a plataforma continental, com intensidades acima da média na primavera e no verão e abaixo da média no outono e no inverno. Esse comportamento é mais evidente nas regiões onde estão localizados os três centros de ressurgência.

Com o propósito de analisar a correspondência entre os padrões encontrados para as forçantes e a ressurgência, foi quantificada a correlação entre a componente principal da EOF2 da TSM (Figura 3b) e as séries temporais das EOF1 das forçantes atmosféricas (Figuras 5b e 6b) e da intensidade da corrente (Figura 7b). Foram utilizadas médias móveis com janelas de 7 dias das forçantes, de forma a considerar tanto a intensidade quanto a persistência, um fator relevante apontado por



Figura 6. (a) Padrão espacial do primeiro modo de variabilidade do rotacional do campo de tensão de cisalhamento do vento. Em preto, estão marcadas as isóbatas de 50 e 150 m. (b) Série temporal da componente principal.

Calil Elias (2009). O coeficiente de correlação entre a componente principal da EOF2 da TSM e a série da regressão linear múltipla das forçantes aumenta de 0,51 (quando consideradas apenas forçantes atmosféricas) para 0,64 ao incluir também a componente principal da EOF1 da corrente.

Os resultados indicam que a variação da intensidade da Corrente do Brasil pode atuar como uma forçante da ressurgência na região sudeste brasileira. Em Cabo Frio, as maiores amplitudes de variações são observadas a oeste da Ilha do Cabo Frio (42°W) (Figura 7). Esta área coincide com a localidade onde foi coletada a série de dados da TSM analisada por Calil Elias (2009), o que evidencia que a variação na intensidade da corrente também pode desempenhar um papel relevante na variabilidade interanual da ressurgência nessa região específica.

# **5. CONCLUSÃO**

Ao analisar a maior série observacional de TSM, com cerca de 20 anos, destinada a ampliar o conhecimento sobre a ressurgência de Cabo Frio, Calil Elias (2009) constatou que a ação dos ventos não é suficiente para explicar a sua variabilidade interanual. Somado a isso, estudos realizados na



Figura 7. (a) Padrão espacial do primeiro modo de variabilidade da intensidade de correntes. Em preto, estão marcadas as isóbatas de 50 e 150 m. (b) Série temporal da componente principal.

Austrália demonstrarem que o transporte na camada limite de fundo, decorrente da intrusão da corrente na plataforma, desempenha um papel significativo como forçante da ressurgência naquela região. Assim, considerando as características semelhantes entre a CB e a Corrente Leste da Austrália, o presente estudo confirmou a hipótese de que a variação da intensidade da CB sobre a plataforma continental, em conjunto com as forçantes atmosféricas, atua impulsionadora da ressurgência na região sudeste como um todo.

Através da análise de EOFs, foi identificado o padrão espacial e temporal da TSM associado à ressurgência na região sudeste do Brasil. O segundo modo da EOF da TSM foi o que melhor definiu os centros de ressurgência, sendo os centros localizados nas regiões de Cabo Frio e de Cabo de São Tomé os mais bem representados. Esses dois centros de ressurgência apresentaram núcleos bem definidos de ascensão da água fria, e as extensões de suas plumas mostraram-se consistentes com a literatura. Na região do Espírito Santo, por outro lado, não foi identificado um núcleo bem definido, sugerindo uma maior variabilidade na posição de ascensão da água fria. Os principais modos de variabilidade espacial e temporal da tensão de cisalhamento do vento e do seu rotacional exibem um padrão sazonal consistente com a literatura, com períodos favoráveis à ressurgência ocorrendo na primavera e no verão. O coeficiente de correlação da componente principal da EOF2 da TSM com a série da regressão linear múltipla das forçantes aumenta de 0,51 (considerando apenas os ventos) para 0,64 quando considerada também a componente principal da EOF1 da corrente. Os resultados da EOF2 da TSM indicaram que a intensidade da ressurgência não ocorre de modo uniforme ao longo da plataforma, havendo regiões preferenciais, como observado em Cabo Frio, que possui as maiores amplitudes de variações acontecendo a oeste da Ilha do Cabo Frio (42°W).

A quantificação do papel de cada forçante no estabelecimento e na determinação dos padrões de variabilidade da ressurgência nos diferentes centros da região sudeste (*e.g.*, transporte de Ekman na superfície pela ação do vento e na camada de fundo pela intrusão da CB) configura objeto de análise para estudos futuros.

# REFERÊNCIAS

ALLARD, P. Anomalies dans le temperature de l'eau de la mer observees au Cabo Frio au Bresil. *Bulletin d'Information sur la Communication Océanographique et l'Étude des Côtes*, v. 7, n. 2, p. 58-63, 1955.

BOWDEN, K. F. *Physical oceanography of coastal waters*. Chichester: Ellis I-lorwood, 1983.

CALADO, L.; SILVEIRA, I. C. A.; GANGOPADHYAY, A.; CASTRO, B. M. Eddy-induced upwelling off cape São Tomé (22°S, Brazil). *Continental Shelf Research*, v. 30, n. 10-11, p. 1181-1188, 2010. https://doi.org/10.1016/j. csr.2010.03.007

CALIL ELIAS, L. M. Variabilidade interanual da ressurgência de Cabo Frio-RJ. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

CAMPOS, E. J. D.; GONÇALVES, J. E.; IKEDA, Y. Water mass characteristics and geostrophic circulation in the South Brazil Bight: Summer of 1991. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 100, n. C9, p. 18537-18550, 1995. https://doi.org/10.1029/95JC01724

CAMPOS, E. J. D.; VELHOTE, D.; DA SILVEIRA, I. C. A. Shelf break upwelling driven by Brazil Current cyclonic meanders. *Geophysical Research Letters*, v. 27, n. 6, p. 751-754, 2000. https://doi. org/10.1029/1999GL010502 CASTELAO, R. M.; BARTH, J. A. Upwelling around Cabo Frio, Brazil: The importance of wind stress curl. *Geophysical Research Letters*, v. 33, n. 3, 2006. https://doi.org/10.1029/2005GL025182

CASTELAO, R. M.; CAMPOS, E. J. D.; MILLER, J. L. A modelling study of coastal upwelling driven by wind and meanders of the Brazil Current. *Journal of Coastal Research*, v. 20, n. 3, p. 662-671, 2004.

CODATO, G. A. S.; WATANABE, W. B.; CALADO, L.; MARTINS, N.; RAMOS, A. E. A. A influência da frente térmica da ressurgência costeira de cabo frio na perda do sinal acústico: um estudo numérico. *In:* ENCONTRO DE TECNOLOGIA ACÚSTICA SUBMARINA, 10., 2011. *Anais* [...]. 2011.

DE CASTRO, B. M.; LORENZZETTI, J. A.; SILVEIRA, I. C.; MIRANDA, L. B. Estrutura termohalina e circulação na região entre o Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS). *In:* MADUREIRA, L. S. P.; ROSSI-WONGTSCHOWSKI, C. L. D. B. *O ambiente oceanográfico da plataforma continental e do talude na Região Sudeste-Sul do Brasil.* São Paulo: Edusp, 2006. p. 11-120.

EMÍLSSON, I. The shelf and coastal waters off southern Brazil. *Boletim do Instituto Oceanográfico*, v. 11, n. 2, p. 101-112, 1961. https://doi. org/10.1590/S0373-55241961000100004

#### Thiago Silva Baron, Marcos Henrique Maruch Tonelli, Victor Bastos Daher, Afonso de Moraes Paiva

FRANZ, G.; GARCIA, C. A. E.; PEREIRA, J.; DE FREITAS ASSAD, L. P.; ROLLNIC, M.; GARBOSSA, L. H. P.; DA CUNHA, L. C.; LENTINI, C. A. D.; NOBRE, P.; TURRA, A.; TROTTE-DUHÁ, J. R.; CIRANO, M.; ESTEFEN, S. F.; LIMA, J. A. M.; PAIVA, A. M.; NOERNBERG, M. A.; TANAJURA, C. A. S.; MOUTINHO, J. L.; CAMPUZANO, F.; PEREIRA, E. S.; LIMA, A. C.; MENDONÇA, L. F. F.; NOCKO, H.; MACHADO, L.; ALVARENGA, J. B. R.; MARTINS, R. P.; BÖCK, C. S.; TOSTE, R.; LANDAU, L.; MIRANDA, T.; DOS SANTOS, F.; PELLEGRINI, J.; JULIANO, M.; NEVES, R.; POLEJACK, A. Coastal ocean observing and modeling systems in Brazil: initiatives and future perspectives. *Frontiers in Marine Science*, v. 8, p. 681619, 2021. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.681619

GELARO, R.; MCCARTY, W.; SUAREZ, M. J.; TODLING, R.; MOLOD, A.; TAKACS, L.; RANDLES, C.; DARMENOV, A.; BOSILOVICH, M. G.; REICHLE, R.; WARGAN, K.; COY, L.; CULLATHER, R.; DRAPER, C.; AKELLA, S.; BUCHARD, V.; CONATY, A.; DA SILVA, A.; GU, W.; KIM, G. K.; KOSTER, R.; LUCCHESI, R.; MERKOVA, D.; NIELSEN, JE.; PARTYKA, G.; PAWSON, S.; PUTMAN, W.; RIENECKER, M.; SCHUBERT, S. D.; SIENKIEWICZ, M.; ZHAO, B. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*, v. 30, n. 14, p. 5419-5454, 2017. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1

HANNACHI, A. *A primer for EOF analysis of climate data*. Reading: Department of Meteorology, University of Reading, 2004.

IKEDA, Y.; DE MIRANDA, L. B.; ROCK, N. J. Observations on stages of upwelling in the region of Cabo Frio (Brazil) as conducted by continuous surface temperature and salinity measurements. *Boletim do Instituto Oceanográfico*, v. 23, p. 33-46, 1974. https://doi. org/10.1590/S0373-55241974000100003

KÄMPF, J.; CHAPMAN, P. *Upwelling systems of the world*. Cham: Springer International Publishing, 2016.

LIMA, J. A. M.; MARTINS, R. P.; TANAJURA, C. A. S.; PAIVA, A. F.; CIRANO, M.; CAMPOS, E. J. D.; SOARES, I. D.; FRANÇA, G. B.; OBINO, R. S.; ALVARENGA, J. B. R. Design and implementation of the Oceanographic Modeling and Observation Network (REMO) for operational oceanography and ocean forecasting. *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 31, n. 2, p. 210-228, 2013. https://doi.org/10.22564/rbgf. v31i2.290

LORENZZETTI, J. A.; STECH, J. L.; MELLO FILHO, W. L.; ASSIREU, A. T. Satellite observation of Brazil Current inshore thermal front in the SW South Atlantic: Space/time variability and sea surface temperatures. *Continental Shelf Research*, v. 29, n. 17, p. 2061-2068, 2009. https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.07.011

MARTINS, B. S. A ressurgência de Vitória. Dissertação (Mestrado) -Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. MIRANDA, L. B. Forma da correlação TS de massas de água das regiões costeira e oceânica entre o Cabo de São Tomé (RJ) e a Ilha de São Sebastião (SP), Brasil. *Boletim do Instituto Oceanográfico*, v. 33, n. 2, p. 105-119, 1985. https://doi.org/10.1590/S0373-55241985000200002

OKE, P. R.; MIDDLETON, J. H. Topographically induced upwelling off eastern Australia. *Journal of Physical Oceanography*, v. 30, n. 3, p. 512-531, 2000. https://doi.org/10.1175/1520-0485(2000)030%3C0512:TIU OEA%3E2.0.CO;2

OKE, P. R.; MIDDLETON, J. H. Nutrient enrichment off Port Stephens: the role of the East Australian Current. *Continental Shelf Research*, v. 21, n. 6-7, p. 587-606, 2001. https://doi.org/10.1016/ S0278-4343(00)00127-8

PAIVA, A. M.; BUENO, L.; GABIOUX, M.; SIQUEIRA, B. P., BUENO, L. F.; BARBERINI, F. D. T.; FREITAS, P. P.; CIRANO, M.; GRIJÓ, A. M.; FERREIRA, T. P.; LARA, A. C. R.; NUNES, I. F. C.; ZIELINSKY, G. M. Modelagem numérica da circulação do oceano atlântico sul e equatorial e estudos de processos oceanográficos no programa de engenharia oceânica da COPPE/UFRJ para atender a demanda da indústria de petróleo: Relatório Técnico 05. Termo de cooperação: 0050.0094389.14.9. Projeto COPPETEC no.:18573. 2019.

PALÓCZY, A.; SILVEIRA, I. C. A.; CASTRO, B. M.; CALADO, L. Coastal upwelling off Cape São Tomé (22 S, Brazil): The supporting role of deep ocean processes. *Continental Shelf Research*, v. 89, p. 38-50, 2014. https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.09.005

RODRIGUES, R. R.; LORENZZETTI, J. A. A numerical study of the effects of bottom topography and coastline geometry on the Southeast Brazilian coastal upwelling. *Continental Shelf Research*, v. 21, n. 4, p. 371-394, 2001. https://doi.org/10.1016/S0278-4343(00)00094-7

ROUGHAN, M.; MIDDLETON, J. H. A comparison of observed upwelling mechanisms off the east coast of Australia. *Continental Shelf Research*, v. 22, n. 17, p. 2551-2572, 2002. https://doi.org/10.1016/ S0278-4343(02)00101-2

ROUGHAN, M.; MIDDLETON, J. H. On the East Australian current: variability, encroachment, and upwelling. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 109, n. C7, 2004. https://doi.org/10.1029/2003JC001833

SCHAEFFER, A.; ROUGHAN, M.; WOOD, J. E. Observed bottom boundary layer transport and uplift on the continental shelf adjacent to a western boundary current. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 119, n. 8, p. 4922-4939, 2014. https://doi.org/10.1002/2013JC009735

SMITH, R. L. Upwelling. *Oceanography and Marine Biology*, v. 6, p. 11-46, 1968.

# PROPAGAÇÃO E ATENUAÇÃO ACÚSTICA NA REGIÃO COSTEIRA DE SEPETIBA/RJ

Acoustic propagation and attenuation in the coastal region of Sapatiba/RJ

Yasmin Cristina Bidú dos Anjos<sup>1\*</sup>, Marcos Tonelli<sup>2</sup>

**Resumo:** O estudo analisa a propagação e a atenuação acústica submarina na Baía de Sepetiba/RJ, destacando os fatores que influenciam esses fenômenos, como temperatura, salinidade e biomassa zooplanctônica. A pesquisa foi conduzida por meio da coleta de dados oceanográficos e biológicos em diferentes pontos da baía. Os resultados mostram que a temperatura da água é o fator mais significativo para a velocidade do som em águas rasas, influenciando, consequentemente, na atenuação acústica. A compreensão desses parâmetros é essencial para aplicações acústicas, como monitoramento ambiental e desenvolvimento de tecnologias de sonar.

Palavras-chave: Acústica submarina. Propagação do som. Atenuação acústica. Zoo-plâncton.

**Abstract:** This study assesses underwater acoustic propagation and attenuation in Sepetiba Bay/RJ, highlighting the factors that influence these phenomena, such as temperature, salinity, and zooplankton biomass. The research was conducted by analyzing a collection of oceanographic and biological data at different points in the bay. The results indicate that water temperature is the most significant factor for sound speed in shallow waters, consequently influencing acoustic attenuation. Understanding these parameters is essential for acoustic applications, such as environmental monitoring and the development of sonar technologies.

Keywords: Underwater acoustics. Sound propagation. Acoustic attenuation. Zooplankton.

1. Engenheira de pesca. Mestra em Acústica Submarina. E-mail: by.anjos@hotmail.com

2. Oceanógrafo. Doutor em Oceanografia Física com ênfase na Interação Oceano-Atmosfera-Criosfera e Mudanças Climáticas pela Universidade de São Paulo. Militar do corpo técnico da Marinha do Brasil (RM3-T) e encarregado da Divisão de Oceanografia Física do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Arraial do Cabo, RJ - Brasil. E-mail: marcos.tonelli@marinha.mil.br

# 1. INTRODUÇÃO

O som é clasificado como uma onda mecânica capaz de transportar energia por longas distâncias no oceano e, por isso, é amplamente utilizado como meio de transmissão de sinais no ambiente submarino (SOUZA, 1997). Esta propriedade da onda sonora desperta interesse de cientistas de todo o mundo, fazendo com que sejam desenvolvidos estudos com aplicações distintas, como a localização de alvos submarinos ou o acompanhamento de animais marinhos (e.g., baleias) (LI, 2012).

A propagação do som no oceano é influenciada pelas propriedades físicas e químicas da água, mais especificamente temperatura, salinidade e densidade (COSTA; MEDEIROS, 2015). Assim, a propagação do som pode ser determinada por meio do estudo desses parâmetros de estado da água do mar, comumente medidos em comissões oceanográficas que utilizam *conductivity, temperature e depth* — CTD.

O CTD é considerado uma das principais ferramentas de medição dos parâmetros físico-químicos do oceano (CRESCENTINI; BENNATI; TARTAGNI, 2012), e as informaçoes coletadas pelo equipamento permitem calcular a velocidade do som, principal forma de quantificar a propagação sonora no ambiente marinho.

A velocidade do som é o principal parâmetro considerado na propagação do som, sendo dependente da compressibilidade e da densidade do meio e variando em cada ponto do oceano e a cada instante de tempo em virtude da dinâmica do ambiente marinho (CORREA JUNIOR, 2008). Diferentes equações utilizam as varáveis de estado da água do mar para calcular a velocidade do som em situações distintas e com diferentes graus de precisão, dependentes da temperatura, da salinidade e da pressão (em geral convertida para profundidade) (CORREA JUNIOR, 2008).

Além dos parâmetros físicos, a propagação do som pode sofrer interferência de fatores biológicos como a densidade de micro-organismos na coluna d'água, a quantidade de partículas em suspensão ou a presença bolhas de ar. Esta interferência ocasiona a perda progressiva da intensidade do sinal, nomeada de atenuação acústica (XAVIER, 2005).

O estudo da acústica submarina demanda a compreensão dos parâmetros que determinam a pro- pagação do som, bem como dos fatores que promovem a atenuação do sinal. Nesse contexto, surge o questionamento sobre o impacto da densidade de organismos que compõem o zooplâncton na propagação do som no ambiente marinho.

## **2. OBJETIVOS**

- » Estimar a atenuação causada pelos organismos zooplanctônicos na região de Sepetiba/RJ;
- avaliar a relevância da atenuação pelo zooplâncton para a propagação acústica.

## **3. METODOLOGIA**

A coleta dos dados oceanográficos ocorreu durante a comissão Paisagem Acústica II na região de Se- petiba/ RJ em setembro de 2022, realizada no âmbito do projeto Sistema Tático de Fatores Ambientais (STFA). Os dados compreendem perfis verticais de temperatura e salinidade da água do mar coletados em três pontos distintos, sendo dois na plataforma continental e um na quebra da plataforma, denominados respectivamente de estação 06, 08 e 14 (Figura 1).

## 3.1. COLETA BIOLÓGICA

A coleta do zooplâncton foi realizada por meio de arrastos verticais utilizando redes cilindro-cônicas com malha de 200  $\mu$ m. As amostras foram fixadas em solução de água do mar com formaldeído 4/100 neutralizado e foram fracionadas, sendo possível obter a biomassa. Os dados biológicos foram utilizados no cálculo da atenuação pela viscosidade e espalhamento pelo zooplâncton.

## 3.2. ÁREA DE ESTUDO

A Baía de Sepetiba é um corpo d'água semifechado com área de 305 km<sup>2</sup>, localizado a aproximadamente 60 km cidade do Rio de Janeiro, e sua bacia ocupa uma área de 200 km<sup>2</sup> (CARREIRA et al., 2009). A região apresenta uma dinâmica costeira marcada por condições oceanográficas muito particulares, como a presença de correntes de ressurgência, variação sazonal significativa na salinidade e temperatura das águas (STRAMMA; ENGLAND, 1999), sendo assim uma região atrativa para estudos oceanográficos e acústicos.



Figura 1. Mapa topográfico da Região dos Lagos Fluminense e batimetria da plataforma continental, onde os pontos amarelos são referentes às estações (06,08,14) de Sepetiba.

## 3.3. CÁLCULO DA ATENUAÇÃO

A atenuação acústica pode ocorrer pela atenuação clássica, pela atenuação pelo espalhamento de partí- culas e pela viscosidade. Assim, como descrito (MOORE, 2011), a atenuação total pode ser calculada pela somatória das três parcelas (Equação 1):

$$\alpha w + \alpha p.s + \alpha p.v = \alpha \tag{1}$$

Em que  $\alpha w$  representa a atenuação clássica,  $\alpha p.s$  consiste na perda pelo espalhamento de partículas (biomassa do zooplâncton) e  $\alpha p.v$  representa a perda pela viscosidade associada ao zooplâncton. O termo  $\alpha w$  é obtido dos dados de temperatura da água em °C (T) e da frequência em Hz (f), conforme a Equação 2.

$$(55.9 - 2.37T + 4.77 \times 10^{-2}T^2 - 3.48x \times 10^{-4}T^3)x 10^5 f^2 = \alpha_w$$
(2)

De acordo Moore (2011), a atenuação pelo espalhamento da biomassa  $\alpha p.s$  é obtida pela Equação 3, em que M representa a concentração do zooplâncton e  $\langle \zeta s \rangle$  representa a média da distribuição da constante de espalhamento (Equação 4):

$$M\langle\zeta s\rangle = \frac{3M\langle az^2X\rangle}{4\rho s\langle az^3\rangle} = \alpha p.s \tag{3}$$

$$\frac{0.29x^4}{0.95 + 1.28x^2 + 0.25x^4} = X \tag{4}$$

Aqui, *az* representa o diâmetro do zooplâncton, que neste caso será considerado uma malha de 200  $\mu$ ,  $\rho$ s consiste na densidade do zooplâncton e *x* representa parâmetros da atenuação da onda considerando-se o produto do número de ondas (*k*) e o comprimento da onda ( $\lambda$ ), conforme o desenvolvimento em Equações 5 e 6:

$$\frac{2\pi}{\lambda} = k \tag{5}$$

$$\frac{c}{f} = \lambda \tag{6}$$

Em que c consiste na velocidade do som calculada com base nos parâmetros (profundidade, salinidade e temperatura) obtidos pelo CTD. De acordo com Medwin e Clay (1998), a velocidade do som é determinada pela temperatura, salinidade e profundidade por meio da equação simplificada de Medwin (1975), que pode ser aplicada para os intervalos 0 < T(°C) < 32 e 22 < S < 45 para profundidades menores que 1.000 m, visto que a equação é uma simplificação da equação empírica desenvolvida por Del Grosso (1974). A simplificação apresenta menos que 0,2 m/s de erro em comparação com a de Del Grosso (1974) para os intervalos especificados acima (Equação 7).

$$1449.2 + 4.6T - 0.055T^{2} + 0.00029T^{3} + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016Z = C$$
<sup>(7)</sup>

Tendo obtido atenuação pelo aquecimento da água e a atenuação por espalhamento de partículas (zooplâncton), é necessário para calcular a atenuação total a última parcela, a atenuação pela viscosidade das partículas (αp.v) (Equação 8).

$$M\langle\zeta s\rangle = \alpha p.v \tag{8}$$

Aqui, M consiste na concentração de massa do zooplâncton e  $\langle \zeta v \rangle$  representa a média da distri- buição da constante de viscosidade. De acordo com Urick (1948), é possível calcular a absorção do som por uma pequena partícula em suspensão por meio de um desenvolvimento teórico mostrado anteriormente por Sewell (1910), em que a partícula, o zooplâncton, é considerada uma pequena esfera rígida.

Assim, de acordo com Urick (1948),  $\langle \zeta v \rangle$  pode ser obtido usando a 9, em que  $\sigma$  consiste em uma relação de densidades (meio e partícula), sendo a densidade do meio ( $\rho$ 0) obtida pelo CTD 10.

 $\rho_0$  Densidade do meio.

*S*, δ Variáveis encontradas pela simplificação da função esférica de Bessel (Urick, 1948) (Equações 9 e 10).

$$\frac{kS(\sigma-1)^2}{2\rho s(S^2+(\sigma-\delta)^2)} = \zeta v \tag{9}$$

$$\frac{\rho s}{\rho 0} = \sigma \tag{10}$$

As variáveis S e  $\delta$  podem ser encontradas por equações simplificadas do resultado da expansão dos termos de primeira e segunda ordem da função esférica de Bessel para a velocidade potencial (Urick, 1948). De acordo com Hay (1983), o parâmetro  $\beta$  é a razão do raio da partícula à espessura viscosa da camada limite (Equações 11 e 12), em que vconsiste na viscosidade cinemática estabelecida com o valor de 1.3 × 10<sup>-6</sup> m2s<sup>-1</sup>. Desta forma, é possível obter os valores de atenuação (m<sup>-1</sup>), sendo necessário convertê-los para dB/m usando as Equações 13 e 14.

$$\frac{9}{4\beta az}(1+(1/\beta az)) = S \tag{11}$$

$$\frac{1}{2}(1 + (9/2\beta az) = \delta$$
 (12)

$$\sqrt{\frac{2\pi f}{v}} = \beta \tag{13}$$

(14)

 $8.7\alpha = a$ 

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos perfis de temperatura e salinidade na plataforma continental interna e na quebra da plataforma revela diferenças significativas que evidenciam a complexidade dos processos oceanográficos nesta região (Figura 2). Essas variações são indicativas da relação entre a localização do ponto de coleta e os parâmetros físicos e químicos da coluna d'água. À medida que se avança para águas mais profundas, as propriedades da água do mar, particularmente a salinidade, exibem mudanças notáveis. Isso é visto, por exemplo, pela comparação entre o perfil de salinidade da estação 14, onde a variação da salinidade acompanha a temperatura, e os demais pontos de coleta, onde se observa um padrão espelhado horizontal, sugerindo a influência de correntes e massas de água distintas.

Acusticamente, essa variação nas propriedades da água é relevante, pois afeta diretamente a pro- pagação do som. O estudo dos perfis de velocidade do som mostra clara correlação com os perfis de temperatura, atestando que este é o parâmetro mais influente para a transmissão sonora na região. Essa relação é particularmente evidente em águas rasas, onde a velocidade do som é altamente dependente da temperatura da água (Figura 3), o que é consistente com a literatura (COSTA; MEDEIROS, 2015).

A velocidade do som é um parâmetro essencial para a modelagem da propagação sonora e, conse- quentemente,



Figura 2. Perfis verticais de temperatura, salinidade e velocidade do som, calculada por Medwin, referente à estação 06.

para a estimativa da atenuação. Ela varia consideravelmente entre as diferentes estações, refletindo as diferenças físicas, químicas e biológicas observadas nos diferentes pontos de coleta (Figuras 4 e 5). Neste contexto, as propriedades físicas como temperatura e salinidade, em conjunto com características biológicas, como a presença de organismos que podem influenciar a viscosidade da água e o espalhamento acústico, têm impacto direto na atenuação do sinal sonoro (Figuras 5, 6 e 7). A comparação entre as estações 06 (Figura 5) e 14 (Figura 7) revela diferenças na atenuação por causa desses fatores biológicos, demonstrando como o ambiente local pode influenciar a propagação do som.

Essas observações são fundamentais para a compreensão da acústica submarina na região, uma vez que a atenuação do som pode ter implicações práticas em várias áreas, como a comunicação submarina, a detecção de objetos submersos e o estudo de ecossistemas marinhos. A eficiência de sistemas de sonar, por exemplo, que dependem da propagação sonora, pode ser afetada por essas variações locais, o que torna crucial



Figura 3. Perfis verticais de temperatura, salinidade e velocidade do som, calculada por Medwin, referente à estação 08.



Figura 4. Perfis verticais de temperatura, salinidade e velocidade do som, calculada por Medwin, referente à estação 14.

o entendimento detalhado dos perfis oceanográficos para a calibração e otimização desses sistemas.

Por fim, os resultados apresentados sublinham a importância de realizar estudos detalhados dos perfis de temperatura, salinidade e velocidade do som em diferentes regiões da plataforma continental. Além disso, a presença de zooplâncton influencia a atenuação acústica com a biomassa e a viscosidade desses organismos, contribuindo para a perda de intensidade do sinal sonoro. Esse tipo de pesquisa não só contribui para o avanço do conhecimento científico sobre os processos oceânicos, mas também tem aplicações práticas na gestão e conservação dos recursos marinhos. A compreensão das complexas interações entre os fatores físicos, químicos e



Figura 5. Atenuação do sinal acústico usando a metodologia (MOORE, 2011) na região de Sepetiba/RJ, referente à estação 06.



Figura 6. Atenuação do sinal acústico usando a metodologia (MOORE, 2011) na região de Sepetiba/RJ, referente à estação 08.





biológicos que afetam a propagação do som é essencial para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis no uso dos oceanos.

# **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O estudo da propagação e atenuação acústica na Baía de Sepetiba demonstrou que a temperatura da água é o fator mais relevante para a velocidade do som em águas rasas, enquanto a salinidade e a biomassa zooplanctônica desempenham papéis secundários, especialmente na atenuação. As diferenças observadas entre as estações de coleta ressaltam a necessidade de um entendimento detalhado das características locais para aplicações acústicas precisas.

Esses resultados contribuem para o conhecimento da acústica submarina em regiões costeiras, podendo auxiliar em futuros estudos e aplicações, como o monitoramento ambiental e a conservação da vida marinha. Recomenda-se que pesquisas futuras considerem a variabilidade temporal e sazonal desses parâmetros para uma compreensão mais abrangente da propagação sonora em ambientes marinhos complexos como a Baía de Sepetiba.

Assim, os dados analisados reforçam a importância de compreender detalhadamente os parâmetros oceanográficos locais, como temperatura, salinidade e biomassa zooplanctônica. Estes fatores desempe- nham papéis críticos na determinação da velocidade do som e na atenuação acústica, especialmente em águas rasas, onde a temperatura se destaca como o principal fator influente.

Além de enriquecer o conhecimento sobre a acústica submarina em regiões costeiras, esses achados têm implicações práticas importantes. Eles podem subsidiar futuros estudos e aplicações, como o moni- toramento ambiental, a conservação da vida marinha e o desenvolvimento de tecnologias de sonar mais precisas. Para um entendimento ainda mais abrangente, recomenda-se que pesquisas futuras considerem a variabilidade temporal e sazonal desses parâmetros, o que permitirá uma modelagem mais precisa da propagação sonora em ambientes marinhos dinâmicos e complexos, como o observado na Baía de Sepe- tiba. Essa abordagem contribuirá para a gestão sustentável dos recursos marinhos e para a mitigação dos impactos do ruído submarino na vida marinha.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Marinha do Brasil, à empresa Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS) e à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) por tornarem possível os trabalhos de campo, por meio dos Termos de Cooperação SIGITEC 2018/00451-6 e 2018/00452-2.

# REFERÊNCIAS

CARREIRA, R. S. *et al.* Hidrocarbonetos e esteróis como indicadores de fontes e destino de matéria orgânica em sedimentos da Baía de Sepetiba, Rio de Janeiro. *Química Nova*, v. 32, n. 7, p. 1805-1811, 2009. https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000700023

CORREA JUNIOR, C. *Estudo da propagação acústica no mar na camada de mistura*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

COSTA, E. S.; MEDEIROS, E. B. Estudo sobre a propagação acústica em águas rasas. *In:* CONGRESSO DE MÉTODOS NUMÉRICOS EM ENGENHARIA, 2015. *Anais* [...]. 2015.

CRESCENTINI, M.; BENNATI, M.; TARTAGNI, M. Design of integrated and autonomous conductivity-temperature-depth (CTD) sensors. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, v. 66, n. 8, p. 630-635, 2012. https://doi.org/10.1016/j.aeue.2012.03.013 DEL GROSSO, V. A. New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations). *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 56, n. 4, p. 1084-1091, 1974. https://doi.org/10.1121/1.1903388

HAY, A. E. On the remote acoustic detection of suspended sediment at long wavelengths. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 88, n. C12, p. 7525-7542, 1983. https://doi.org/10.1029/JC088iC12p07525

LI, Q. *Digital sonar design in underwater acoustics:* principles and applications. Berlim: Springer Science & Business Media, 2012. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18290-7

MEDWIN, H. Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 58, n. 6, p. 1318-1319, 1975. https://doi.org/10.1121/1.380790

MEDWIN, H.; CLAY, C. S. Fundamentals of acoustical oceanography. Amsterdam: Elsevier, 1998.

MOORE, S. Suivi des flux d'eau et de matières en suspension dans les cours d'eau par profileurs acoustiques Doppler horizontaux. Tese (Doutorado) – Universidade de Grenoble, Grenoble, 2011. SEWELL, C. J. T. The extinction of sound in a viscous atmosphere by small obstacles of cylindrical and spherical form. *Proceedings* of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, v. 83, n. 566, p. 547-548, 1910. https://doi.org/10.1098/rspa.1910.0045

SOUZA, L. A. L. Princípios de sonar. *Instituto de Pesquisas da Marinha*, v. 30, n. 1, p. 248, 1997.

STRAMMA, L.; ENGLAND, M. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 104, n. C9, p. 20863-20883, 1999. https://doi. org/10.1029/1999JC900139

URICK, R. J. The absorption of sound in suspensions of irregular particles. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 20, n. 3, p. 283-289, 1948. https://doi.org/10.1121/1.1906373

XAVIER, B. C. *Modelos de propagação acústica em águas rasas.* Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

# EXPANSÃO DE BASE DE DADOS UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL GENERATIVA COM FOCO EM ALVOS PEQUENOS EM OPERAÇÃO DE BUSCA E SALVAMENTO

Database expansion using generative artificial intelligence focused on small targets in search and rescue operations

Victor André Lima<sup>1</sup>

Resumo: O avanço da visão computacional e das técnicas de aprendizado de máquina, impulsionado pelo aumento do poder computacional, tem sido amplamente aplicado em diversos setores, incluindo o militar. No Brasil, sistemas aéreos remotamente pilotados (SARP) são empregados em missões de busca e salvamento (search and rescue ----SAR) na costa brasileira e no oceano Atlântico sul. A busca visual de alvos pequenos, como pessoas e embarcações miúdas, enfrenta desafios devidos à fadiga mental e ocular dos operadores, além das limitações das câmeras em termos de zoom e cobertura. Para superar essas dificuldades, este projeto explora o uso de inteligência artificial generativa para criar um banco de dados sintético de imagens, especificamente treinado com imagens do RQ-1, um SARP utilizado pela Marinha do Brasil. Empregando a ferramenta ControlNet/Reference na interface Automatic1111 WebUI, foram geradas imagens simuladas baseadas em imagens reais extraídas de vídeos do RQ-1. A análise qualitativa das imagens geradas demonstrou que o método com ControlNet/Reference foi eficaz em reduzir artefatos e produzir imagens com características semelhantes às reais, oferecendo uma alternativa viável para aumentar a base de dados de treinamento para redes neurais detectoras e, potencialmente, economizar tempo e recursos. Palavras-chave: Stable diffusion. Visão computacional. Busca e salvamento. Detecção de objetos. Banco de imagens. Aumento de dados. Abstract: Advancements in computer vision and machine learning techniques, driven by increased computational power, have become widely applied across various sectors, including the military. In Brazil, remotely piloted aircraft systems (RPAS) are used in search and rescue (SAR) missions along the Brazilian coast and in the South Atlantic Ocean. Visual searches for small targets, such as people and small vessels, face challenges due to operator fatigue and camera limitations in terms of zoom and coverage. To address these issues, this project explores the use of generative artificial intelligence to create a synthetic image database, specifically trained with images from the RQ-1, an RPAS used by the Brazilian Navy. Using the ControlNet/Reference tool within the Automatic1111 WebUI interface, simulated images were generated based on real images extracted from ScanEagle RQ-1 videos. A qualitative analysis of the generated images showed that the ControlNet/Reference method effectively reduced artifacts and produced images with real-like characteristics, offering a viable alternative for augmenting the training database for detector networks and potentially saving time and resources.

Keywords: Stable diffusion. Computer vision. Search and rescue. Object detection. Image dataset. Data augmentation.

1. Primeiro-Tenente (EN). Mestre em Engenharia Aeronáutica e Mecânica pelo Instituto Tecnológico da Aeronáutica. Encarregado do Centro de Desenvolvimento de Sistemas da Aviação no Comando da Força Aeronaval, Marinha do Brasil, São Pedro da Aldeia, RJ - Brasil. E-mail: victor.andre@marinha.mil.br

# **1. INTRODUÇÃO**

A rede neural, ou inteligência artificial (IA) generativa (*generative adversarial network*) (ROMBACH *et al.*, 2021), pode ser utilizada a fim de gerar imagens para a construção de um banco de dados sintético numa espécie de aumento de dados, ou *data augmentation*, que tem um efeito muito benéfico em aplicações de imagens com aprendizado de máquina Perez e Wang (2017). Já existem ferramentas e *frameworks* avançados para tornar o uso da tecnologia de IA generativa mais difundido (AUTOMATIC1111, 2022).

O uso de algoritmos de visão computacional associado a técnicas de aprendizado de máquina se tornou mais comum conforme o poder computacional no mundo aumentou (HWANG, 2018). Hoje há uma larga gama de aplicações nas quais os algoritmos de aprendizado são utilizados em grandes quantidades de dados, amplificando a geração de conhecimento em diversas áreas e setores. O setor militar não foge desta tendência e, além de representar uma parte crucial com deveres sociais, é um setor de alta tecnologia e competitividade (HEBERLING, 1995). No Brasil, têm-se sistemas aéreos remotamente pilotados (SARP) sob posse das Forças Armadas, e eles estão atualmente sendo empregados em uma multiplicidade de missões. As operações de busca e salvamento (search and rescue - SAR) na costa brasileira e no oceano Atlântico Sul são uma das atribuições internacionalmente reconhecidas do Brasil. Especificamente os SARP usados na Marinha do Brasil, ScanEagle RQ-1 (MARINHA DO BRASIL, 2024), são utilizados para busca visual de alvos em áreas marítimas. A operação pode ser entendida basicamente como um operador a distância que controla o caminho e a câmera da aeronave enquanto monitora a imagem para identificar alvos de interesse, ou resgatáveis, em caso de operação SAR. Surgem então restrições provenientes de fatores humanos na tarefa de busca visual (Aviation Supplies and Academics, Inc., 2017), os quais são mais acentuadas conforme a missão se prolonga (GOWRISANKARAN et al., 2012): fadiga mental, que é o estado no qual o operador, ao manter o foco em imagem monótona, pode deixar de detectar pequenas alterações na imagem; e fadiga ocular, dada pela manutenção de atenção visual durante toda a operação e que pode resultar em cansaço visual e reações fisiológicas, como ressecamento do globo ocular ou lacrimejamento excessivo.

Além disso, há restrição do equipamento, principalmente relacionada à câmera: o *zoom* óptico traz uma melhor descrição, em *pixels*, de possíveis alvos, ao passo que reduz a área de cobertura da imagem no mar. Levantam-se possibilidades de uso de algoritmos de aprendizado de máquina em imagens para auxiliar o operador na detecção de alvos com maior probabilidade de não detecção humana, ou seja, alvos pequenos como pessoas e embarcações miúdas. Para tal, mesmo que haja grande quantidade de imagens aéreas em ambiente marítimo disponíveis na internet, o escopo deste projeto se dá no uso de imagens específicas do RQ-1 para treinamento e foco em alvos muito pequenos que possam passar despercebidos por um observador humano. A obtenção de grande quantidade de imagens, crucial para um treinamento bem-sucedido de rede neural detectora, torna-se dispendiosa de tempo e recursos financeiros, uma vez que demandaria campanhas de voo do RQ-1 com diversos tipos de alvo, posicionamento de alvo na imagem e longos períodos de filmagens, para então fazer uma construção manual da base de imagens.

Se a IA generativa junto com os *frameworks* pode ser utilizada para gerar imagens semelhantes àquelas do RQ-1, faz-se uma análise qualitativa e visual quanto à semelhança das imagens sintéticas comparadas a características de imagens reais do RQ-1. Futuramente, esta base de dados poderá ser utilizada para o treinamento da rede detectora, possivelmente economizando tempo, recursos humanos e financeiros.

Atualmente há diversos autores que trabalharam no âmbito da detecção de alvos em SAR marítimo. Domozi *et al.* (2020) utilizam a detecção de objetos para pessoas, com processamento em dispositivos móveis. Surmann *et al.* (2023) têm um desenvolvimento parecido, porém para a detecção de pessoas, automóveis e outros alvos de interesse em ambiente terrestre, especificamente em zonas de incêndio. Banuls *et al.* (2020) abordam o ambiente marítimo com fusão de dados de câmera sensível ao espectro infravermelho térmico e espectro visível. Zhao e Song (2024) fazem uso do banco de dados de imagem publicado SeaDronesSee, que é um banco de imagens específico para veículos aéreos no ambiente marítimo.

## 2. METODOLOGIA

Foi escolhida a interface Automatic1111 WebUI (AUTOMATIC1111, 2022), que pode utilizar diversos *checkpoints* de modelo de IA generativa Stable Diffusion v1.5 (ROMBACH *et al.*, 2021). Essa interface tem diversas funcionalidades que são ainda mais expansíveis por meio de extensões feitas por colaboradores.

Para a geração de imagens com semelhança às imagens reais do RQ-1, identificam-se dois métodos possíveis:

- Treinamento de hiper-rede (CHAUHAN *et al.*, 2024): por meio de um banco de imagens, é feito o treinamento da hiper-rede que atua paralelamente ao modelo do Stable Diffusion de forma a adaptar a imagem de saída. Neste caso, há o treinamento de um modelo de rede, e seria questionável quão grande o banco de imagens reais deveria ser para garantir a confiabilidade da análise;
- Uso da extensão ControlNet na funcionalidade Reference (ZHANG; RAO; AGRAWALA, 2023): neste caso, usa--se uma imagem como referência para a geração de uma nova imagem no estilo da referência. Ou seja, uma imagem, bem escolhida conforme o objetivo da tarefa, pode gerar múltiplas outras.

Escolhe-se a opção da ControlNet/Reference, com as seguintes restrições:

• Como o foco será em alvos muitos pequenos, a imagem de referência deverá ser com alvo muito pequeno;

- A imagem de referência não deverá ter corpos terrestres; ou seja, ao redor do alvo deverá predominar água;
- Deverão ser utilizadas múltiplas imagens de referência para cobrir as tonalidades médias de imagem mais comuns durante a operação.

Dos vídeos de operação obtidos do RQ-1, totalizando mais de 9 horas, 49 minutos e 30 segundos, foram extraídas 6.654 imagens, tiradas uniformemente a cada 5 segundos. Dessas imagens, foram escolhidas quatro referências de acordo com as tonalidades predominantes do mar observadas durante a operação (Figura 1).

## 2.1. GERAÇÃO DE IMAGENS

Com as referências escolhidas, configura-se a interface A1111 WebUI para utilizar o ControlNet em modo Reference. As configurações de geração são um conjunto de parâmetros que controlam como o processo de geração de conteúdo se dará do *prompt* até os dados finais, no caso, a imagem. Como exemplo, o parâmetro *Classifier-Free Guidance* 



Figura 1. Imagens de referência a serem utilizadas na geração.

(CFG) atribui o grau de prioridade para os itens fornecidos no *prompt*: quanto menor seu valor, mais dispersa dos itens do *prompt* a imagem poderá ser. A ferramenta de geração foi utilizada conforme parâmetros gerais na Tabela 1, que são valores comumente utilizados em tutoriais.

Foram escolhidas arbitrariamente as 16 imagens para uma análise comparativa:

- Quatro imagens *seeds* de 1.111 a 1.114;
- Quatro imagens *seeds* de 2.222 a 2.225;
- Quatro imagens *seeds* de 3.333 a 3.336;
- Quatro imagens *seeds* de 4.444 a 4.447.

Respectivamente, cada subgrupo será comparado à sua versão com referência — (A) a (D) (Figura 1). Além disso, cem imagens com *seeds* de 10.000 a 10.099 foram dispostas em formato de grade e comparadas de forma a obter uma visualização geral da transformação e serão expostas à referência (A).

## **3. RESULTADOS**

Com a geração das primeiras 16 imagens, foi feita uma análise qualitativa comparando suas versões sem e com ControlNet. A geração com as quatro referências teve um efeito nítido de alteração construtiva nas imagens. Consegue-se perceber características específicas das imagens reais, como granulação, tonalidade média e até efeito de oclusão das bordas, que faz com que as imagens tenham cantos escuros (Figura 2 comparada com Figura 3). Também se nota que, em certas *seeds* de geração, a geração pura, sem referência, traria alguns artefatos, como rochedos ou mãos, parcialmente, na imagem (Figuras 4, 5 e 6). Com o uso da referência, as novas imagens tendem a ter esses artefatos retirados (Figuras 7 e 8) ou atenuados/reduzidos (Figura 9); a visualização da grade de cem imagens (Figura 10) só reforça estas observações.

Importante notar que, em geral, o efeito da referência também faz com que os alvos gerados sejam menores e, junto

Parâmetro	Valor				
Stable Diffusion Checkpoint	Realistic Vision V60B1_v51VAE				
Largura x Altura	512 x 512 <i>pixels</i>				
Iterações (Sampling steps)	35				
Prompt	tiny person floating in the middle of the sea, film grain, view from above, view from far				
CFG Scale	7				
ControlNet Unit 0					
Enable	Ativo				
LowVRAM	Ativo				
Pixel Perfect	Ativo				
Reference	reference_only				
Control Mode	Balanced				
Style Fidelity	1				
Demais configurações	Padrão				

#### Tabela 1. Configurações utilizadas para a geração de imagens.



Figura 2. Imagens de seeds de 2.222 a 2.225 sem referência.

#### Victor André Lima



Figura 3. Imagens de seeds de 2.222 a 2.225 com imagem de referência B.



Figura 4. Imagens de seeds de 1.111 a 1.114 sem referência.



Figura 5. Imagens de seeds de 3.333 a 3.336 sem referência.



Figura 6. Imagens de seeds de 4444 a 4447 sem referência.

com o efeito de oclusão das bordas, contribuiria ainda mais para a qualidade do banco de imagens específico para o RQ-1 no objetivo em questão.

# **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Com o uso do modelo da IA generativa Stable Diffusion, foi possível gerar múltiplas imagens com uma característica muito próxima à de imagens capturadas pelo ScanEagle RQ. A capacidade generativa se mostrou promissora, pois, com uma possibilidade teoricamente infinita de geração, podem-se economizar muitas horas de voo com a aeronave e prosseguir com um treinamento de detecção para alvos pequenos estando em posse de um banco de imagens maior e de qualidade. Ainda que não seja possível comparar o resultado do método de ControlNet/ Reference com o de hiper-rede, entende-se que os resultados foram satisfatórios, sendo ainda mais enaltecidos pela simplicidade de usar poucas imagens bem selecionadas para a geração múltipla e ter uma abordagem precisa focada no equipamento



Figura 7. Imagens de seeds de 1.111 a 1.114 com imagem de referência A.



Figura 8. Imagens de seeds de 3.333 a 3.336 com imagem de referência C.



Figura 9. Imagens de seeds de 4.444 a 4.447 com imagem de referência D.

e nas condições estipuladas. Há também possibilidade de gerar imagens diferentes conforme o *prompt* é modificado, o que dá ainda mais flexibilidade para esta aplicação. É importante ressaltar que, para a futura implementação no treinamento do detector de objetos, o banco de dados deve ter imagens com situações críticas para detecção óptica, como névoa, chuva e reflexão de luz solar. Em suma, este método também pode ser aplicado a qualquer outro equipamento, aeronave ou não, para expandir a quantidade de dados de imagem sem ter que operá-lo, o que pode trazer benefícios para o desenvolvimento de tecnologias de aprendizado de máquina que tenham como parte crucial o banco de imagens para treinamento.



Figura 10. Imagens de seed de 10.000 a 10.099 (a) sem referência e (b) com referência.

# REFERÊNCIAS

AUTOMATICIIII. *Stable Diffusion Web UI*. 2022. Disponível em: https://github.com/AUTOMATICIIII/stable-diffusion-webui. Acesso em: 3 set. 2024.

AVIATION SUPPLIES AND ACADEMICS, INC. *Human Factors: Vision, Scanning, and Judgement.* Aviation Supplies and Academics, Inc., 2017. Disponível em: https://learntoflyblog.com/human-factors-vision-scanning-and-judgement/. Acesso em: 3 set. 2024.

BANULS, A. *et al.* Object detection from thermal infrared and visible light cameras in search and rescue scenes. *In*: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SAFETY, SECURITY, AND RESCUE ROBOTICS, 2020. *Anais* [...]. 2020. p. 380-386.

CHAUHAN, V. K. *et al.* A brief review of hypernetworks in deep learning. *Artificial Intelligence Review*, v. 57, n. 250, 2024. https://doi. org/10.48550/arXiv.2306.06955

DOMOZI, Z. *et al.* Real time object detection for aerial search and rescue missions for missing persons. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE OF SYSTEM OF SYSTEMS ENGINEERING, 15., 2020. *Anais* [...]. 2020. p. 000519-000524.

GOWRISANKARAN, S. *et al.* Asthenopia and blink rate under visual and cognitive loads. *Optometry and Vision Science*, v. 89, n. 1, p. 97-104, 2012. https://doi.org/10.1097/ opx.0b013e318236dd88

HEBERLING, C. R. T. M. E. Competition strategies for defense projects. *Project Management Journal*, v. 26, n. 1, p. 32-40, 1995.

HWANG, T. Computational power and the social impact of artificial intelligence. *arXiv preprint arXiv*, 1803.08971, 2018. https://doi. org/10.48550/arXiv.1803.08971

56

#### Victor André Lima

MARINHA DO BRASIL. *RQ1 - Scan Eagle*. Marinha do Brasil, 2024. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/meios-navais/rq1-scaneagle. Acesso em: 8 ago. 2024.

PEREZ, L.; WANG, J. The effectiveness of data augmentation in image classification using deep learning. *arXiv preprint arXiv*, 1712.04621, 2017. https://doi.org/10.48550/arXiv.1712.04621

ROMBACH, R. et al. High-resolution image synthesis with latent diffusion models. arXiv preprint arXiv, 2021. https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.10752

SURMANN, H. et al. UAVs and Neural Networks for search and rescue missions. arXiv preprint arXiv, 2023. https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.05512

ZHANG, L.; RAO, A.; AGRAWALA, M. Adding conditional control to text-toimage diffusion models. *In*: IEEE/CVF INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION, 2023. *Anais* [...]. 2023. p. 3836-3847.

ZHAO, B.; SONG, R. Enhancing two-stage object detection models via data-driven anchor box optimization in UAV-based maritime SAR. *Nature*, v. 14, p. 4765, 2024. https://doi.org/10.1038/s41598-024-55570-z

# VIGILÂNCIA DA AMAZÔNIA AZUL: APRIMORANDO A CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS NAVAIS COM APRENDIZADO DE MÁQUINA ROBUSTO

Blue Amazon surveillance: enhancing naval image classification with robust machine learning

Gabriel Custódio Rangel<sup>1</sup> <sup>(i)</sup>, Luiz Frederico Horácio de Souza de Barros Teixeira<sup>2</sup> <sup>(i)</sup>, Victor Benicio Ardilha da Silva Alves<sup>3</sup> <sup>(i)</sup>, Igor Pinheiro de Araújo Costa<sup>4</sup> <sup>(i)</sup>

Resumo: O avanço tecnológico é crucial para a segurança e vigilância, especialmente no ambiente marítimo, onde a vasta extensão das áreas costeiras exige sistemas automatizados. Tecnologias como inteligência artificial, aprendizado de máquina e visão computacional estão na vanguarda desses desenvolvimentos, permitindo avanços na vigilância. No entanto, a eficácia dessas tecnologias depende da integridade dos dados de treino, que podem ser corrompidos por erros humanos, falhas nos sensores ou ataques adversariais. Com o objetivo de criar um modelo de classificação de imagens marítimas, a abordagem inovadora proposta utiliza a Minimização de Risco de Rockafellian (Rockafellian Risk Minimization - RRM) no combate à contaminação dos dados, ajustando os pesos da rede neural e alterando as probabilidades para isolar a corrupção, reduzindo a necessidade de extenso tratamento de dados e acelerando seu processamento. A eficácia do modelo RRM foi validada em comparação com métodos tradicionais, visando maior robustez na detecção de navios e aprimorando a vigilância marítima da Marinha do Brasil.

**Palavras-chave:** Aprendizado de máquina. Visão computacional. Redes neurais. Minimização de risco de Rockafellian. Abstract: Technological advancement is crucial for enhancing security and surveillance, especially in the maritime environment, where the vastness of coastal areas requires automated systems. Technologies such as artificial intelligence, machine learning, and computer vision are at the forefront of these developments, enabling significant progress in surveillance. However, the effectiveness of these technologies depends on the integrity of training data, which can be compromised by human errors, sensor failures, or adversarial attacks. With the aim of developing a robust maritime image classification model, the innovative approach proposed employs Rockafellian Risk Minimization (RRM) to combat data contamination by adjusting neural network weights and altering probabilities to isolate corruption. This reduces the need for extensive data preprocessing and accelerates processing time. The effectiveness of the RRM model has been validated in comparison to traditional methods, aiming for greater robustness in ship detection and enhancing maritime surveillance for the Brazilian Navy.

Keywords: Machine learning. Computer vision. Neural networks. Rockafellian risk minimization.

<sup>1.</sup> Capitão de corveta. Mestre em Pesquisa Operacional pela Naval Postgraduate School (Califórnia, Estados Unidos). Gerente de Projetos da Divisão de Pesquisa Operacional do Centro de Análises de Sistemas Navais, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: gabriel.custodio@marinha.mil.br

<sup>2.</sup> Capitão de corveta. Mestre em Engenharia de Produção com ênfase em Pesquisa Operacional pela Universidade Federal Fluminense. Analista da Divisão de Pesquisa Operacional do Centro de Análises de Sistemas Navais, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: luiz.frederico@marinha.mil.br

<sup>3.</sup> Capitão de corveta. Mestre em Pesquisa Operacional pela Naval Postgraduate School (Califórnia, Estados Unidos). Analista da Divisão de Pesquisa Operacional do Centro de Análises de Sistemas Navais, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: benicio@marinha.mil.br

<sup>4.</sup> Capitão-Tenente. Mestre em Engenharia de Produção com ênfase em Pesquisa Operacional pela Universidade Federal Fluminense. Analista da Divisão de Pesquisa Operacional do Centro de Análises de Sistemas Navais, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: igor.pinheiro@marinha.mil.br

Gabriel Custódio Rangel, Luiz Frederico Horácio de Souza de Barros Teixeira, Victor Benicio Ardilha da Silva Alves, Igor Pinheiro de Araújo Costa

# **1. INTRODUÇÃO**

Os campos da Inteligência Artificial (*Artificial Inteligence* — AI) e do aprendizado de máquina (*Machine Learning* — ML) estão se expandindo rapidamente, possibilitando que máquinas tomem decisões baseadas em dados. Nesse contexto, a visão computacional (*Computer Vision* — CV) destaca-se por utilizar algoritmos avançados para interpretar informações visuais, permitindo que máquinas analisem dados visuais de formas antes impossíveis (SZELISKI, 2022). Em aplicações militares, essas ferramentas melhoram a tomada de decisões, aumentam a vigilância e auxiliam sistemas autônomos em ambientes complexos.

O Brasil, com cerca de 4,5 milhões de quilômetros quadrados de espaços marítimos sob jurisdição nacional, conta com a Marinha do Brasil (MB) para garantir sua soberania (VENTURA, 2020). Em 2004, a MB introduziu o termo "Amazônia Azul" para se referir à extensa área do Oceano Atlântico sob jurisdição brasileira (MARINHA DO BRASIL, 2019). Para assegurar a defesa desse território, a MB desenvolveu o Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul (SisGAAz), projetado para monitorar as Águas Jurisdicionais Brasileiras (AJB) e áreas internacionais de responsabilidade para operações de Socorro e Salvamento (*Search and Rescue* — SAR), integrando satélites, sistemas multiplataforma, radares e sensores (ANDRADE; ROCHA; FRANCO, 2021).

A aplicação das técnicas discutidas neste trabalho em sistemas de defesa e vigilância, como o SisGAAz, fortalece a estrutura de Comando e Controle (C2) da MB, alinhando--se às diretrizes estratégicas de proteção da Amazônia Azul e aumento da Consciência Situacional Marítima (CSM). Essa abordagem resulta em uma maior capacidade de detecção, identificação e resposta a ameaças híbridas e incidentes de segurança nas AJB (MARINHA DO BRASIL, 2020).

Neste sentido, o presente estudo propõe uma abordagem inovadora baseada em ML para aprimorar os sistemas de vigilância e detecção de navios na Amazônia Azul, com foco na proteção das AJB. Em vez de seguir a tradicional Minimização do Risco Empírico (*Empirical Risk Minimization* — ERM) para Redes Neurais (*Neural Networks* — NN), explora-se uma alternativa chamada Minimização de Risco de Rockafellian (*Rockafellian Risk Minimization* — RRM) (ROYSET; CHEN; ECKSTRAND, 2022). A NN utilizada foi uma Rede Neural Convolucional (*Convolutional Neural Network* — CNN), especialmente eficaz na extração de informações de imagens, utilizando um processo chamado convolução, que a torna mais eficiente com esse tipo de dado (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016; KHAN et al., 2018). A presente pesquisa possibilita o desenvolvimento de modelos de detecção de navios mais robustos, ao testar um método inovador para lidar de forma eficaz com a corrupção de dados, aprimorando a detecção automática de navios e, consequentemente, a segurança marítima.

## **2. OBJETIVOS**

Este estudo teve como objetivo desenvolver um algoritmo de ML para automatizar a detecção de embarcações em imagens marítimas, garantindo resiliência e operação autônoma. O foco concentra-se na classificação de imagens, utilizando a inserção de ruídos como abordagem para simular ataques adversariais, que consistem em ações externas maliciosas destinadas a comprometer a integridade do sistema por meio da manipulação dos dados de entrada ou de treinamento.

Para a MB, a implementação desse algoritmo resultará em uma ferramenta robusta de apoio à decisão. A automatização proporcionará não apenas a redução da necessidade de intervenção humana, mas também a otimização dos recursos disponíveis e aprimora a eficiência operacional, contribuindo para uma vigilância marítima mais segura e econômica.

## **3. METODOLOGIA**

Neste trabalho, foi desenvolvido o conceito de relaxação de Rockafellian (ROYSET; CHEN; ECKSTRAND, 2022) no contexto do ML, introduzindo a RRM para treinar modelos com dados corrompidos. A metodologia foi contrastada com a ERM tradicional, destacando suas vantagens e limitações, com o objetivo de aprimorar a robustez em cenários com dados comprometidos e oferecer uma solução alternativa eficaz para detectar anomalias e ruídos.

Dado um conjunto de imagens rotuladas, onde  $x_j$  especifica os atributos de cada pixel da *j*-ésima imagem e  $y_j$  é o rótulo correspondente, busca-se determinar um vetor de parâmetros w em uma NN para que a previsão corresponda ao rótulo. Considerando dois rótulos, -1 e 1 e  $g_w(x_j)$  a previsão da NN para a *j*-ésima imagem possuir o rótulo correto, utiliza-se a Gabriel Custódio Rangel, Luiz Frederico Horácio de Souza de Barros Teixeira, Victor Benicio Ardilha da Silva Alves, Igor Pinheiro de Araújo Costa

função de perda de entropia cruzada binária (Equação 1) para determinar o vetor w que minimiza a perda

$$f_{j}(w) = \begin{cases} -lng_{w}(x_{j}), se \quad y_{j} = 1\\ -ln(1 - g_{w}(x_{j})), se \quad y_{j} = -1. \end{cases}$$
(1)

A ERM clássica consiste em resolver o problema de otimização apresentado na Equação 2

$$\min_{w \in \mathbb{R}^d} \sum_{j=1}^n p_j f_j(w), \tag{2}$$

onde p = 1/n normalmente, embora os dados possam ser ponderados de maneira diferente. Em muitas aplicações, os dados podem ser corrompidos por erros de coleta, entrada, rotulagem ou por ataques adversariais. Royset, Chen e Eckstrand (2022) apontam que uma NN treinada com a abordagem ERM pode apresentar desempenho insatisfatório nesses casos, o que justifica o uso da RRM para identificar e eliminar dados corrompidos, aumentando a confiabilidade do modelo.

A RRM utiliza variáveis de decisão auxiliares  $u_1, ..., u_n$ para ajustar a probabilidade associada a cada ponto de dado. Isso leva à formulação da Equação 3

$$\underset{w \in \mathbb{R}^{d}, u \in U}{\text{minimizer}} \sum_{j=1}^{n} ((p_{j} + u_{j})f_{j}(w) + \theta |u_{j}|), \tag{3}$$

onde  $\theta$  representa um parâmetro de penalidade, e *u* é um vetor de perturbação com *n* dimensões que altera o vetor de probabilidade nominal *p*, e o conjunto U é definido pela Equação 4

$$U = \left\{ u \in \mathbb{R}^n \middle| u_j \ge -p_j, \sum_{j=1}^n u_j = 0 \right\}.$$
 (4)

Ajusta-se a probabilidade associada a cada ponto adicionando  $u_j$  a  $p_j$ . Para identificar os dados corrompidos, deve-se otimizar u com base na perda calculada, de forma a reduzir a probabilidade que afeta  $f_j(w)$  a zero, eliminando tais dados do processo de treinamento.

O método RRM emprega uma Heurística de Direção Alternada baseada em Programação Linear (*Alternating Direction Heuristic - Linear Programming* — ADH-LP), que alterna a otimização de variáveis enquanto mantém as demais fixas (RANGEL, 2023). A estratégia alterna entre a otimização de *w*, ajustando os pesos da rede neural, e *u*, modificando as probabilidades associadas aos pontos para isolar dados corrompidos, repetindo esse ciclo até atingir o número de iterações definido. A programação linear otimiza u por meio de uma função objetivo com restrições lineares, enquanto o parâmetro  $\mu \in (0,1]$  representa o passo (*stepsize*) que atualiza *u* a cada iteração *i*. Ressalta-se que os componentes de  $u^i$  somam zero e são sempre maiores que  $-p_i$ .

### **3.1. ALGORITMO ADH-LP**

Dados: Número de épocas K, número de iterações  $\tau$ , pesos iniciais  $w^0$ , *stepsize*  $\mu$ .

Passo 0. Definir o contador de iteração  $i = 1, p^1 = p, u^1 = 0$ .

Passo 1. A partir de  $w^{i-1}$ , usar um algoritmo de otimização por gradiente por K épocas

$$\min_{w \in \mathbb{R}^d} \sum_{j=1}^n p_j^i f_j(w).$$

Em que W<sup>i</sup> será a solução resultante.

Passo 2. Selecionar  $u^{i+1}$ , para aplicação na programação linear baseada em  $W^i$  e  $u^i$ .

Passo 3. Resolver o problema de otimização linear

$$\underset{u \in U, v \in \mathbb{R}^n}{\operatorname{minimizer}} \sum_{j=1}^n (u_j f_j(w^i) + \theta v_j) s. a. u_j \le v_j, -u_j \le v_j, j = 1, \dots, n.$$

Seja  $(u^*, v^*)$  um minimizador.

Passo 4. Definir  $u^{i+1} = \mu u^* + (1 - \mu)u^i$ .

Passo 5. Se  $i < \tau$ , definir  $p^{i+1} = p + u^{i+1}$ , substituir i por i+1 e voltar ao Passo 1.

Caso contrário, encerrar as iterações.

## **4. RESULTADOS**

Foram realizados experimentos considerando diferentes níveis de contaminação de rótulos no conjunto de treinamento, começando com 10, 20, 30 e 40%, trocando aleatoriamente os rótulos dos dados de treinamento. Testes com maiores níveis de contaminação, como 50 e 60%, também foram realizados, mas a CNN utilizada não demonstrou um nível de aprendizado aceitável.

Nos testes, foi utilizado o *TensorFlow* (versão 2.11.0). Diversas combinações de hiperparâmetros foram testadas até a obtenção de um resultado satisfatório. Na fase inicial do ADH, durante a otimização de *w*, empregou-se o otimizador *Stochastic Gradient Descent* (SGD) (ROYSET; WETS, 2021) com taxa de aprendizado de 0,1 e *momentum* de 0,9, utilizando uma GPU Nvidia Tesla V100 com 32 GB de memória. Na segunda fase do processo ADH, o algoritmo ADH-LP foi empregado para a otimização de *u*, utilizando o *Pyomo* (versão 6.4.0) em conjunto com o *solver* CPLEX.

A arquitetura da CNN foi mantida constante para garantir uma comparação consistente entre as abordagens RRM e ERM. A CNN processa imagens RGB redimensionadas para 128 x 128 pixels, utilizando a função ReLU (*Rectified Linear Unit*) nas camadas ocultas e *softmax* na camada de saída para classificação binária. Com 8.409.026 pesos treináveis, a estrutura detalhada da CNN encontra-se descrita na Tabela 1.

Com o modelo base da ERM estabelecido, aplicou--se o modelo RRM ADH-LP. Os hiperparâmetros para a

comparação entre as abordagens ERM e RRM estão apresentados na Tabela 2.

### **4.1. AIRBUS DATASET**

O conjunto de dados *Airbus Ship Detection* (KAGGLE, 2018), parte de um desafio no Kaggle em 2018, contém 18.392 imagens RGB de satélite com resolução de 768 x 768 pixels. Para a análise, foi selecionada uma amostra balanceada de 10.428 imagens, divididas igualmente entre as categorias "navio" e "sem navio."

A Tabela 3 mostra que a RRM oferece uma precisão consistentemente superior à da ERM em todos os valores

#	Camada	Filtros	Kernel	Saída	# Parâmetros	
1	Convolução	70	7.47	100 y 100 y 70	896	
2	Normalização em <i>Batch</i>	52	3X3	128 X 128 X 32	128	
3	Max-Pooling		2x2	64 x 64 x 32	-	
4	Ativação Convolução	64	3x3	64 x 64 x 64	10,400	
	Max-Pooling	64	2x2	32 x 32 x 64	18.496	
5	Totalmente Conectada	100 1100		8.388.736		
6	Normalização em <i>Batch</i>	128		I X 128	512	
7	<i>Softmax</i> (Saída)	2		1 x 2	258	

#### Tabela 1. Descrição da CNN utilizada para SGD.

### Tabela 2. Parâmetros utilizados para o ERM e RRM.

Algoritmo	Épocas (κ)	lterações (τ)	<i>Stepsize</i> (μ)	Penalidade (θ)
ERM	500	1	-	-
RRM(ADH-LP)	10	50	0,5	0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35

#### Tabela 3. Precisão no Conjunto de Dados AIRBUS para ERM e RRM\*.

Porcentagem de Dados de Treinamento Corrompidos							
Método	40%	30%	20%	10%	0%		
ERM	0,560	0,629	0,681	0,735	0,769		
RRM (μ = 0,5)							
θ = 0,15	0,603	0,739	0,745	0,774	0,764		
θ = 0,20	0,671	0,755	0,753	0,775	0,769		
θ = 0,25	0,687	0,733	0,757	0,769	0,767		
θ = 0,30	0,684	0,744	0,764	0,765	0,774		
θ = 0,35	0,661	0,747	0,764	0,770	0,779		

\*Os valores destacados em azul representam os casos em que a RRM supera ou iguala a ERM.

de  $\theta$  testados. Com 20% de corrupção, a RRM se destaca com uma melhoria de 8,3% na precisão, especialmente com  $\theta$  = 0,30. À medida que a corrupção aumenta para 30% ( $\theta$  = 0,20), a RRM melhora 12,6%. Com 40% de corrupção, a RRM demonstra robustez, com melhorias de 11,1, 12,7 e 12,4% para  $\theta$  = 0,20; 0,25 e 0,30, respectivamente. Mesmo com 10 e 0% de corrupção, o desempenho da RRM permanece comparável ou superior ao da ERM, destacando sua flexibilidade. O valor  $\theta$  = 0,30 mostrou-se mais eficaz no conjunto de dados *Airbus*, mantendo desempenho consistente em diferentes níveis de corrupção, inclusive em cenários com pouca ou nenhuma corrupção. Uma análise detalhada dos resultados com 40% de contaminação nos dados revela o impacto significativo do parâmetro  $\theta$  no desempenho da técnica escolhida. Mesmo no cenário menos favorável, com  $\theta$  = 0,15, a RRM superou a ERM, atingindo uma acurácia de 0,603, enquanto a ERM alcançou apenas 0,560, o que representa uma melhoria de 4,3%. Tal fato pode ser observado na Figura 1.

Na Figura 2, com o parâmetro  $\theta$  ajustado para 0,25, a RRM demonstrou um desempenho ainda mais robusto, alcançando uma acurácia de 0,687. Isso representa um incremento de 12,7% em relação aos 0,560 obtidos pela ERM, reforçando a vantagem do ajuste adequado de  $\theta$  na RRM.



Figura 1. Acurácia de ERM e RRM ( $\theta$  = 0,15 e 40% de contaminação).



Figura 2. Acurácia de ERM e RRM ( $\theta$  = 0,25 e 40% de contaminação).

Esses resultados evidenciam que, independentemente do valor de  $\theta$ , a RRM supera a ERM. Contudo, a escolha do parâmetro  $\theta$  é essencial para maximizar o desempenho do modelo, com melhorias expressivas na acurácia do teste, conforme ilustrado na análise.

# **5. CONCLUSÃO**

O estudo apresentou uma estratégia inovadora para o treinamento de CNN, propondo uma inovação considerável em relação à abordagem tradicional da ERM, ao introduzir a RRM. Aplicado ao conjunto de dados AIRBUS e utilizando o otimizador SGD, o método da RRM, através do algoritmo ADH-LP, demonstrou ser mais robusto, especialmente em cenários com dados corrompidos, superando o desempenho da ERM. O ADH-LP se destacou por equilibrar eficazmente a gestão da corrupção dos dados e a otimização do desempenho, mostrando resiliência notável mesmo sob altos níveis de corrupção.

Com a crescente demanda por sistemas autônomos de detecção, a integração de modelos avançados, como o ADH-LP, em sistemas de vigilância automatizados pode melhorar significativamente o monitoramento marítimo. Esses sistemas, quando equipados com sensores e câmeras de alta resolução, são capazes de identificar embarcações e atividades suspeitas com maior precisão, mesmo em cenários de dados corrompidos. A adoção do ADH-LP aumenta a robustez da análise, reduz a intervenção humana e aprimora a eficácia operacional.

Os resultados indicam que algoritmos computacionais, como o ADH-LP, emergem como tecnologias promissoras para a MB, oferecendo melhorias significativas na CSM e na capacidade de resposta a ameaças. A integração dessas inovações nos sistemas de C2 representa um avanço estratégico na proteção dos interesses nacionais e na garantia da soberania no Atlântico Sul.

# REFERÊNCIAS

ANDRADE, I. O.; ROCHA, A. J. R.; FRANCO, L. G. A. *Blue Amazon Management System (SisGAAz):* sovereignty, surveillance and defense of the Brazilian jurisdictional waters. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2021. https://doi.org/10.38116/ dp261

GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. *Deep learning*. Cambridge: MIT Press, 2016. Disponível em: http://www. deeplearningbook.org. Acesso em: 12 abr. 2024.

KAGGLE. *Airbus Ship Detection Challenge*. Kaggle, 2018. Disponível em: https://kaggle.com/competitions/airbus-ship-detection. Acesso em: 30 maio 2024.

KHAN, S.; RAHMANI, H.; SHAH, S. A. A.; BENNAMOUN, M. A guide to convolutional neural networks for computer vision. Springer International Publishing, 2018. https://doi. org/10.1007/978-3-031-01821-3

MARINHA DO BRASIL. *Plano Estratégico da Marinha 2040 (PEM 2040)*. Brasil: Marinha do Brasil, 2020. Disponível em: https://www. marinha.mil.br/pem2040. Acesso em: 19 ago. 2024.

MARINHA DO BRASIL. *Política Naval da Marinha do Brasil*. Brasil: Marinha do Brasil, 2019. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/ sites/default/files/politicanaval\_site.zip. Acesso em: 20 abr. 2023.

RANGEL, G. C. *Robust machine learning for computer vision in naval application.* Tese (Mestrado) – Naval Postgraduate School, Monterey, 2023. Disponível em: https://apps.dtic.mil/sti/trecms/pdf/AD1213194. pdf. Acesso em: 20 maio 2023.

ROYSET, J. O.; CHEN, L. L.; ECKSTRAND, E. Rockafellian relaxation in optimization under uncertainty: asymptotically exact formulations. *arXiv*, 2022. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2204.04762. Acesso em: 20 maio 2023.

ROYSET, J. O.; WETS, R. J.-B. An optimization primer. Cham: Springer International Publishing, 2021. https://doi. org/10.1007/978-3-030-76275-9

SZELISKI, R. *Computer vision:* algorithms and applications. 2. ed. Londres: Springer, 2022.

VENTURA, V. A. M. F. *Environmental jurisdiction in the law of the sea: the Brazilian Blue Amazon.* Cham: Springer Nature, 2020.

# APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE REALCE DE VOZ E MÁSCARAS ACÚSTICAS PARA APRIMORAMENTO DAS COMUNICAÇÕES POR VOZ NO TELEFONE SUBMARINO

Application of speech enhancement techniques and acoustic masks for improving speech communications on the underwater telephone

Antônio Walkir Sibanto Caldeira<sup>1</sup>, Rafael Marinati de Barros Martiny<sup>2</sup>, Jefferson Osowsky<sup>3</sup>, Renato Peres Vio<sup>4</sup>

Resumo: Este artigo apresenta um estudo sobre a aplicação de métodos de realce e máscaras acústicas, usualmente empregadas na acústica aérea, no aprimoramento dos aspectos perceptuais da voz em um telefone acústico submarino. Para esta análise, foi desenvolvida uma base própria de dados de voz composta por palavras empregadas na comunicação entre os navios da Marinha do Brasil, utilizando locutores nativos de língua portuguesa. Foram propostos dois cenários experimentais, ambos distorcidos por dois tipos de ruídos acústicos distintos. No primeiro cenário, os sinais de voz foram corrompidos somente com ruído ambiente, e os métodos de realce OMLSA e UMMSE foram avaliados por meio de medidas de qualidade (SegSNR) e inteligibilidade (ESII). No segundo cenário, foi incluído o efeito da reverberação, considerando seis cenários reverberantes, e os métodos anteriores, juntamente com uma máscara acústica ideal (IRM) e cega (BRM), foram avaliados pela medida SRMR. Em ambos os cenários experimentais, o OMLSA apresentou melhores resultados quando comparado às soluções cegas.

**Palavras-chave:** Acústica submarina. Telefone submarino. Realce de voz. Máscara acústica.

Abstract: This paper presents a study focused on the application of enhancement methods and acoustic masks, generally used in airborne acoustics, to improve the perceptual aspects of speech in an underwater acoustic telephone. For this analysis, an own speech database was developed with words used among the ships of the Brazilian Navy, with native portuguese speakers. Two experimental scenarios were proposed, both corrupted by two distinct acoustic noises. In the first, speech signals were corrupted only with ambient noise, and the OMLSA and UMMSE enhancement methods were evaluated by a quality (SegSNR) and intelligibility (ESII) measure. In the second, the effect of reverberation was included, considering six reverberant scenarios, and the previous methods, in addition to ideal (IRM) and blind (BRM) acoustic mask, were evaluated by the SRMR measure. In both experimental scenarios, OMLSA showed better results when compared to blind solutions.

Keywords: Underwater acoustics. Underwater telephone. Speech enhancement. Acoustic mask.

2. Primeiro-Tenente (RM2-EN). Mestre em Engenharia Elétrica pelo Instituto Militar de Engenharia. Assessor para Sistemas de Comando e Controle/Relação com ICTs do Programa SisGAAz da Diretoria de Gestão de Programas da Marinha, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: rafael.martiny@marinha.mil.br

Capitão-Tenente (EN). Mestre em Engenharia de Defesa pelo Instituto Militar de Engenharia. Ajudante da Divisão de Comunicações Submarinas do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Niterói, RJ - Brasil. E-mail: antonio.caldeira@marinha.mil.br

<sup>3.</sup> Analista de Pesquisa e Desenvolvimento do Departamento de Inovação na OceanPact Serviços Marítimos, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. Email: jefferson.osowsky@ oceanpact.com

<sup>4.</sup> Capitão-de-Fragata (EN). Doutor em Engenharia Acústica pela Naval Postgraduate School da US Navy. Professor do Programa de Pós-graduação em Acústica Submarina e Encarregado da Divisão de Engenharia Acústica do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Niterói, RJ - Brasil. E-mail: peres.vio@marinha.mil.br

# **1. INTRODUÇÃO**

A comunicação acústica submarina desempenha um papel fundamental em uma ampla gama de atividades humanas e naturais, atraindo a atenção de diversas instituições mundo afora devido às suas aplicações de interesse dual, voltadas para a exploração dos recursos marinhos, monitoramento ambiental, pesquisa científica e operações militares. Dentre os diversos sistemas de comunicação, destacam-se aqueles que empregam o sinal de voz, frequentemente adotados em situações de elevada criticidade, nas quais uma mensagem mal compreendida ou não recebida pode levar a sérios riscos operacionais. Mergulhadores utilizam transdutores acoplados às suas máscaras para manter contato contínuo com sua equipe submersa ou na superfície (WOODWARD; SARI, 1996). No âmbito militar, os telefones submarinos são cruciais para salvamento e resgate de submarinos em emergência e são regulados pela norma internacional Material Interoperability Requirements for Submarine Escape and Rescue (OTAN STANAG 1475).

A recepção de um sinal de voz que trafega no ambiente acústico submarino com boa qualidade e inteligibilidade<sup>1</sup> é um grande desafio em razão das particularidades do canal submarino. Durante a propagação, as ondas sonoras são atenuadas em virtude do espalhamento geométrico do pulso acústico, à medida que se afastam da fonte, dos processos de absorção e das interações dessas ondas com o fundo e a superfície do oceano. Essas interações resultam em múltiplas reflexões do sinal, causando o indesejado efeito de reverberação, que pode comprometer a compreensão da mensagem recebida. Soma-se a isso a dificuldade em estimar a resposta ao impulso do canal, que varia principalmente em função dos parâmetros que afetam o perfil de velocidade do som no mar (temperatura, salinidade e pressão da água) e da geometria do canal (distância, profundidade e batimetria).

Além disso, o sinal de interesse também sofre distorções do ruído ambiente, cuja multiplicidade de fontes e a natureza não estacionária podem corromper severamente a qualidade e inteligibilidade da mensagem. No ambiente submarino, os ruídos podem ser classificados como naturais ou antropogênicos. Os ruídos naturais dividem-se em bióticos, gerados pela vida marinha, como cardume de peixes, cetáceos e camarões, e abióticos, causados por atividades sísmicas, ondas e chuvas. Dentre os ruídos antropogênicos, destacam-se os provenientes de embarcações, canhões de ar (*airguns*) e sonares ativos.

Esses desafios exigem a implementação de técnicas capazes de aprimorar a qualidade e a inteligibilidade dos sinais acústicos de interesse, mitigando os efeitos da reverberação e dos ruídos acústicos, garantindo a robustez e a confiabilidade das comunicações. Nesse contexto, métodos de realce de voz têm sido estudados com o objetivo de atenuar as distorções causadas pelos ruídos nos sinais de interesse, visando ao aumento da qualidade do sinal (CALDEIRA; COELHO, 2021). Máscaras acústicas também são mencionadas na literatura como soluções para simular o sistema auditivo humano e melhorar a inteligibilidade de sinais em cenários acústicos reverberantes e ruidosos (MARTINY; ALCÂNTARA; COELHO, 2022). Como o emprego dessas soluções tem sido majoritariamente voltado para a acústica aérea, este trabalho realizará um estudo sobre a aplicação dessas técnicas no cenário acústico submarino, considerando as distorções e variações causadas pelo ruído ambiente e pela reverberação, além das especificidades do processamento de sinais da voz dos telefones submarinos.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi analisar e comparar os resultados obtidos por métodos de realce e máscaras acústicas, originalmente desenvolvidos para a acústica aérea, no aprimoramento da qualidade e inteligibilidade dos sinais de voz no contexto da comunicação acústica submarina utilizando o Telefone Submarino. Para este estudo, foram considerados diferentes graus de reverberação da voz e ruídos acústicos submarinos com características temporais e espectrais variadas. O objetivo específico deste trabalho foi desenvolver um banco de dados próprio contendo palavras empregadas na comunicação entre os meios navais da Marinha do Brasil, incluindo numerais, com locutores nativos da língua portuguesa, para a realização dos experimentos.

## **3. METODOLOGIA**

## 3.1. COMUNICAÇÃO ACÚSTICA POR TELEFONE SUBMARINO

A Figura 1 apresenta um esquema da comunicação acústica por voz no Telefone Submarino adotada neste artigo. Os sinais

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> A inteligibilidade reflete o quanto uma mensagem acústica é compreensível, podendo ser avaliada objetivamente pelo número de palavras ou fonemas identificados corretamente por um locutor.



Figura 1. Esquemático da comunicação por voz no Telefone Submarino.

de áudio captados pelo microfone, x(t), são digitalizados e modulados analogicamente em amplitude com portadora suprimida de banda única (*Amplitude Modulation Single Sideband* - *Suppressed Carrier* – AM SSB-SC), na frequência de 8,0875 kHz. Essa modulação é a mais comumente empregada nas comunicações submarinas por voz (OTAN STANAG 1475). O sinal modulado é então convertido para sinal analógico e transmitido por uma fonte acústica no canal submarino, onde é distorcido pelas múltiplas reflexões no fundo e na superfície, além de sofrer a adição de ruído ambiente. Sendo assim, o sinal y(t), captado pelo hidrofone no sistema de recepção, pode ser modelado matematicamente como (Equação 1):

$$y(t) = x_{mod}(t) * h(t) + n(t),$$
 (1)

sendo  $x_{mod}(t)$  o sinal de voz modulado a partir de x(t), b(t) a resposta ao impulso do canal e n(t) o ruído ambiente. No sistema de recepção, o sinal é demodulado e passa por um filtro passa-faixa de 300Hz a 3kHz, que corresponde à faixa de frequência adotada na telefonia analógica convencional para comunicação submarina. Nos experimentos propostos neste trabalho, as distorções causadas pela reverberação e pelo ruído ambiente no canal submarino foram simuladas com recursos computacionais, e os métodos para mitigar os efeitos da reverberação e do ruído ambiente foram aplicados após a etapa de filtragem.

### **3.2. BANCO DE DADOS**

Para este estudo, foi desenvolvido um banco de dados de voz próprio, composto por 32 locutores voluntários, sendo 12 mulheres e 20 homens, que pronunciaram 36 palavras em áudios com duração de 2 segundos. O conjunto de palavras inclui as 26 letras do alfabeto fonético da OTAN, de Alfa a Zulu, e 10 algarismos em português, de Zero a Nove, utilizados nos meios navais. As gravações foram realizadas em uma sala fechada, com interferência mínima de reverberação ou ruído ambiente. Para a captura dos áudios, foi utilizada uma mesa de som Behringer Xenyx qx1002usb e um microfone Shure SM58, com frequência de amostragem de 48 kHz. Com o objetivo de analisar as distorções provocadas pelos ecos nas palavras subsequentes em cenários com reverberação, todas as palavras gravadas foram concatenadas em um único sinal de áudio para cada locutor.

## **3.3. CENÁRIOS EXPERIMENTAIS**

Dois ruídos acústicos submarinos foram selecionados para corromper o sinal de voz: Biológico e Chuva. O Ruído Biológico foi gravado em uma estação submarina pertencente ao Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, localizada próxima ao costão rochoso em Arraial do Cabo-RJ, sendo predominante os sons gerados por animais invertebrados marinhos presentes no costão, como o camarão-estalo. O Ruído Chuva foi obtido da base de dados do Discovery of Sound in the Sea. Esses ruídos foram utilizados para corromper os sinais de interesse em níveis de signal-to-noise ratio (SNR) de -5, 0 e 5 dB. A SNR foi calculada considerando a energia do ruído na mesma faixa de frequência dos sinais de voz modulados. A Figura 2 ilustra os espectrogramas e os índices de não-estacionariedade (INS) dos ruídos, calculados na faixa de frequência que corrompe a voz modulada durante 3 segundos do ruído. O INS é uma medida objetiva para quantificar a não-estacionariedade de um sinal (BORGNAT et al., 2010). A curva em vermelho representa


Figura 2. Espectrograma dos ruídos ambientais (acima) e seus respectivos INS (abaixo).

os valores de INS medidos para cada escala de observação  $\frac{T_h}{T}$ , sendo  $T_b$  é a janela de tempo adotada na análise e T é a duração total do sinal. A linha tracejada em verde representa o limiar de estacionariedade. Com base nessa análise, os ruídos Chuva e Biológico podem ser classificados como estacionário e não--estacionário, respectivamente.

O primeiro cenário consistiu em analisar e comparar os resultados obtidos pelos métodos de realce em um canal submarino sem o efeito da reverberação, considerando somente a distorção causada pelo ruído ambiente. As soluções de realce de voz *optimally-modified log-spectral amplitude* (OMLSA) (COHEN; BERDUGO, 2001) e *unbiased minimum mean-square error* (UMMSE) (GERKMANN; HENDRIKS, 2011) foram avaliadas com base em duas medidas objetivas que analisam os aspectos perceptuais da voz: uma de qualidade (*segmental signal-to-noise ratio* – segSNR) (HANSEN; PELLOM, 1998) e outra de inteligibilidade (*extended speech intelligibility index* – ESII) (RHEBERGEN; VERSFELD, 2005).

O segundo cenário considerou o canal reverberante e ruidoso, utilizando-se o modelo computacional de propagação acústica submarina BELLHOP (PORTER, 2016), baseado na teoria de traçados de raios, para estimar a resposta ao impulso do canal. O ambiente simulado consistiu em uma fonte acústica posicionada a uma profundidade de 80 metros, transmitindo um sinal até um hidrofone situado a 15 quilômetros de distância da fonte, na mesma profundidade, em um canal com profundidade constante de 100 metros. Foram obtidas seis respostas ao impulso do canal, resultantes de combinações de dois perfis de velocidade do som (*sound speed profile* – SSP) registrados em experimentos reais realizados em Arraial do Cabo, com três fundos distintos, *Sand* (Areia), *Gravel* (Cascalho) e *Chalk* (Pedra Calcária), nesta ordem de menor para maior reverberação. As propriedades geoacústicas dos fundos, adotadas para o modelo, foram extraídas da Tabela 1.3 do livro de Jensen *et al.* (2011). Os perfis de SSP e exemplos de espectrogramas obtidos para os três tipos de fundos podem ser observados na Figura 3.

Neste segundo cenário, os sinais foram processados pelos mesmos métodos de realce utilizados no primeiro cenário, além de duas máscaras acústicas descritas na literatura para aprimorar a inteligibilidade de sinais reverberantes e ruidosos. A *Ideal Reverberant Mask* (IRM) é uma máscara ideal que utiliza informações do sinal de voz limpo, proporcionando os melhores resultados no aprimoramento da inteligibilidade. Já a *Binary Reverberant Mask* (BRM) (HAZRATI; LEE; LOIZOU, 2012) é uma máscara não ideal (cega), proposta para supressão de reverberação em situações nas quais as informações do sinal de interesse não estão disponíveis *a priori*. Para este cenário, foi adotada uma medida não intrusiva da qualidade e inteligibilidade empregada em cenários reverberantes (*speech to reverberation modulation energy ratio* – SRMR) (FALK; ZHENG; CHAN, 2010).

## **4. RESULTADOS**

### 4.1. CENÁRIO EXPERIMENTAL SEM REVERBERAÇÃO

A Figura 4 exibe os resultados da média dos incrementos obtidos no SegSNR ( $\Delta$ SegSNR) em relação aos resultados não processados (NP, ou seja, sem os métodos de realce). O método OMLSA apresentou os melhores aprimoramentos para ambos os ruídos, destacando-se um incremento de 2,45 dB contra 1,06 dB do UMMSE no Ruído Chuva com SNR de 5 dB. Além disso, observou-se que, para o ruído Biológico, a diferença entre os resultados obtidos pelo OMLSA e pelo UMMSE foi ainda mais significativa, especialmente nos casos de SNR de -5 e 0 dB. De modo geral, verificou-se que, quanto maior o SNR, maior o  $\Delta$ SegSNR obtido para ambos os métodos. Por fim, os

métodos de realce demonstraram os maiores  $\Delta SegSNR$  para o ruído Chuva, indicando um desempenho superior dessas soluções na mitigação de ruídos estacionários.

A Figura 5 apresenta um gráfico boxplot para os resultados da medida ESII, cujos valores variam entre 0 e 1, indicando que maiores valores refletem maior inteligibilidade. Observa-se, inicialmente, que os valores de ESII para o ruído Chuva são ligeiramente menores do que para o ruído Biológico, principalmente em SNRs mais baixas, sugerindo que o ruído estacionário distorce mais as componentes da voz no tempo e na frequência. Por outro lado, os maiores aprimoramentos na inteligibilidade também foram associados ao ruído Chuva, evidenciando o bom desempenho dos métodos de realce em lidar com ruídos estacionários. Por exemplo, para os sinais corrompidos com SNR de 0 dB, os aumentos percentuais nas médias do ESII obtidos pelo OMLSA (ESII de 0,506) e pelo UMMSE (ESII de 0,428) foram de 32,8 e 12,3% em relação ao NP (ESII de 0,381) para o ruído Chuva, e 20,2% (ESII de 0,506) e 5,5% (ESII de 0,444), em relação ao NP (ESII de 0,421) para o ruído Biológico, respectivamente. Assim como no aprimoramento da qualidade, o OMLSA obteve os melhores resultados de inteligibilidade pelo ESII em todos os cenários analisados.



Figura 3. Os SSP (à esquerda) e os espectrogramas de um sinal de voz com reverberação para os 3 fundos adotados neste trabalho comparado ao mesmo sinal de voz sem reverberação (à direita).

## 4.2. CENÁRIO EXPERIMENTAL COM REVERBERAÇÃO

A Figura 6 ilustra os resultados da medida SRMR para o cenário com reverberação, calculados como a média dos 32 sinais concatenados de cada locutor, considerando as três SNR e 2 SSP, totalizando 192 sinais de áudio para cada coluna. Como esperado, a máscara ideal IRM obteve os melhores resultados em todos os cenários avaliados. Contudo, o método de realce OMLSA, ainda que não tenha sido originalmente proposto para cenários reverberantes, apresentou os maiores aprimoramentos







Figura 5. Resultados do ESII.



entre as demais soluções, seguido pelo UMMSE e pela BRM. Esse desempenho manteve-se mesmo no cenário com maior reverberação (fundo Pedra Calcária). De modo geral, observou--se que, quanto maior a reverberação, maior o distanciamento entre a média do SRMR obtida pela IRM e as demais soluções. Ao comparar os resultados entre os ruídos, observou-se que esse distanciamento é ainda maior com o ruído não-estacionário. No ruído Chuva, a média de SRMR do OMLSA (2,22) chegou a 96% do resultado obtido pela IRM (2,31) no cenário com menor reverberação (fundo Areia), contrastando com os 79% obtido com o fundo Pedra Calcária corrompido com o ruído Biológico (1,55 de 1,96).

## **5. CONCLUSÃO**

Este trabalho apresentou um estudo sobre o emprego de métodos de realce de sinais e máscaras acústicas, usualmente empregados na acústica aérea, em um sistema de telefonia acústica submarina, adotando uma base de dados de voz específica para essa finalidade. Foram propostos dois cenários experimentais, sendo um corrompendo o sinal de voz somente com ruído ambiente e outro incluindo o efeito da reverberação, considerando dois ruídos e seis cenários reverberantes distintos. Os resultados indicaram que o método OMLSA apresentou os melhores aprimoramentos na qualidade e inteligibilidade da voz no cenário sem reverberação, e uma melhora na SRMR superior às soluções cegas no cenário com reverberação. Para trabalhos futuros, sugere-se a implementação de métodos capazes de estimar a resposta ao impulso do canal submarino para a mitigação da reverberação, além da implementação de soluções de realce baseadas em aprendizado de máquina e redes neurais, com o objetivo de comparar seus resultados com os obtidos neste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos os locutores que, voluntariamente, participaram da montagem do banco de dados de voz próprio para este trabalho, cujas contribuições foram essenciais para a conclusão desta pesquisa.

Figura 6. Resultados da medida SRMR.

## REFERÊNCIAS

BORGNAT, P.; FLANDRIN, P.; HONEINE, P.; RICHARD, C.; XIAO, J. Testing stationarity with surrogates: A time-frequency approach. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 58, n. 7, p. 3459-3470, 2010. https://doi.org/10.1109/TSP.2010.2043971

CALDEIRA, A.; COELHO, R. Realce de sinais em ambiente com variações acústicas subaquáticas. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS, 39., 2021. *Anais* [...]. 2021.

COHEN, I.; BERDUGO, B. Speech enhancement for non-stationary noise environments. *Signal Processing*, v. 81, n. 11, p. 2403-2418, 2001. https://doi.org/10.1016/S0165-1684(01)00128-1

DISCOVERY OF SOUND IN THE SEA. *Audio gallery*. Disponível em: https://dosits.org/galleries/audio-gallery/. Acesso em: 5 fev. 2024.

FALK, T. H.; ZHENG, C.; CHAN, W.-Y. A non-intrusive quality and intelligibility measure of reverberant and dereverberated speech. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, v. 18, n. 7, p. 1766-1774, 2010. https://doi.org/10.1109/ TASL.2010.2052247

GERKMANN, T.; HENDRIKS, R. C. Unbiased MMSE-based noise power estimation with low complexity and low tracking delay. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, v. 20, n. 4, p. 1383-1393, 2011. https://doi.org/10.1109/TASL.2011.2180896 HANSEN, J. H. L.; PELLOM, B. L. An effective quality evaluation protocol for speech enhancement algorithms. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPOKEN LANGUAGE PROCESSING, 5., 1998. *Anais* [...]. 1998. p. 2819-2822.

HAZRATI, O.; LEE, J.; LOIZOU, P. C. Binary mask estimation for improved speech intelligibility in reverberant environments. *In:* INTERSPEECH, 2012. *Anais* [...]. 2012. p. 162-165.

JENSEN, F. B.; KUPERMAN, W. A.; PORTER, M. B.; SCHMIDT, H. Computational ocean acoustics. New York: Springer, 2011.

MARTINY, R.; ALCÂNTARA, R.; COELHO, R. Avaliação da predição objetiva da inteligibilidade de sinais reverberantes e ruidosos com uso de máscaras acústicas. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS, 40., 2022. *Anais* [...]. 2022.

PORTER, M. B. *Bellhop3d user guide*. Technical report, Heat, Light, and Sound Research Inc., 2016.

RHEBERGEN, K. S.; VERSFELD, N. J. A speech intelligibility indexbased approach to predict the speech reception threshold for sentences in fluctuating noise for normal-hearing listeners. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 117, n. 4, p. 2181-2192, 2005. https://doi.org/10.1121/1.1861713

WOODWARD, B.; SARI, H. Digital underwater acoustic voice communications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 21, n. 2, p. 181-192, 1996. https://doi.org/10.1109/48.486793

# EXPLORANDO FORMADORES DE FEIXE ADAPTATIVOS COM O ALGORITMO DE ALOCAÇÃO DE NULOS PARA SUPRESSÃO DE LÓBULOS LATERAIS\*

Exploring adaptive beamformers with the null placing sidelobe suppression algorithm

Vitor Teixeira Klingelfus<sup>1</sup>, José Antonio Apolinário Jr.<sup>2</sup>, Cláudio Augusto Barreto Saunders Filho<sup>3</sup>, Rodrigo Caiado de Lamare<sup>4</sup>

Resumo: Este trabalho explora a supressão de lóbulos laterais em um diagrama de radiação de um formador de feixe adaptativo (adaptive beamformer - ABF), em um arranjo de antenas de um receptor, a exemplo de um receptor de medidas ativas de guerra eletrônica (MAGE), propondo novas abordagens que empregam algoritmos adaptativos com restrições lineares. Os métodos tradicionais de formação de feixe objetivam fornecer uma resposta sem distorção do sinal de interesse e rejeição de interferências. No entanto, eles não focam na supressão dos lóbulos laterais, o que pode ser crucial para a melhoria da relação sinal-ruído mais interferência. Logo, o propósito deste trabalho foi controlar o nível dos lóbulos laterais do diagrama de radiação de um receptor de guerra eletrônica em concomitância com a redução de interferências de sinais indesejados que chegam ao arranjo de antenas. A recepção do sinal é baseada em um modelo de sinal de banda base complexo passando por uma arquitetura típica de receptor. Após uma visão geral sobre o modelo de sinal, o texto mergulha na teoria de filtros adaptativos com restrições lineares, preparando a base para poder detalhar como aplicar o novo algoritmo proposto para supressão de lóbulos laterais, o null placement sidelobe suppression (NP-SLS), em versões de filtros adaptativos com restrições. A principal ideia por trás do algoritmo NP-SLS é a adição de restrições lineares para colocar nulos nos picos dos lóbulos laterais quando estes excedem um limite pré-estabelecido. Resultados de simulações demonstram a efetividade da abordagem proposta no controle dos lóbulos laterais e seu efeito na supressão adaptativa de interferências indesejadas para diferentes números de antenas em um arranjo MAGE. O estudo reuniu as contribuições de maneira a corroborar com pesquisas futuras em formação de feixe adaptativo com supressão de lóbulos lateais.

Abstract: This work explores sidelobe suppression in adaptive beamformers (ABF) based on a recently introduced technique for null placement, proposing new approaches that employ constrained adaptive algorithms, applicable to electronic warfare receivers. ABF methods primarily aim at a distortionless response with interference suppression, usually not oriented to sidelobe level (SLL) control. However, SLL control might be crucial for signal-to-interference-plus-noise ratio enhancement. Therefore, the purpose is to control SLL concomitantly with reducing the interference of undesired signals impinging on the array. The signal reception is based herein on a complex baseband snapshot vector model, passing through a typical receiver architecture. After a comprehensive overview of the signal model, the text delves into linearly constrained adaptive filters, setting the groundwork for detailing how to apply the null placement sidelobe suppression technique (NP-SLS) to constrained versions of adaptive filtering algorithms. The main idea behind the NP-SLS algorithm is the addition of linear constraints to place nulls on the sidelobe peaks above a specified minimum level. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed approach in controlling SLL and its effect on adaptive interference suppression for different numbers of antennas in an electronic warfare array. The study summarizes the findings, which may help future research in adaptive beamforming with enhanced sidelobe control.

Keywords: Sidelobe suppression. Adaptive beamforming. Linear constraints. Interference. Radiation efficiency.

**Palavras-chave:** Supressão de lóbulos laterais. Formador de feixe adaptativo. Restrições lineares. Interferência.

<sup>1.</sup> Mestrando em Processamento Digitais de Sinais pelo Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: klingelfus@marinha.mil.br

<sup>2.</sup> Professor doutor pelo Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: apolin@ieee.org

<sup>3.</sup> Professor doutor pelo Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: saunders@ime.eb.br

<sup>4.</sup> Professor doutor pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: delamare@puc-rio.br

<sup>\*</sup>Este artigo é uma re-impressão do original publicado no "19th International Symposium on Wireless Communication Systems" - ICWS 2024, autorado pelos mesmos contribuidores e com o mesmo título.

## **1. INTRODUÇÃO**

Técnicas de processamento de sinal em arranjos de sensores podem ser empregadas para enfatizar o sinal de interesse (SDI) proveniente de uma direção específica, bem como para reduzir a in- terferência proveniente de direções indesejadas. Esse processo de filtragem espacial é conhecido na literatura como formação de feixe (beamforming - BF) (VAN TREES, 2002; DINIZ et al., 2022), e pode ser classificado em determinística, ótima e adaptativa. A BF determinística não depende das estatísticas dos dados recebidos, mas utiliza direções conhecidas para enfatizar ou atenuar os sinais correspondentes (DINIZ et al., 2022). A BF ótima, por sua vez, baseia-se no conhecimento das informações estatísticas dos sinais de entrada, como no caso da BF de resposta sem distorção e potência mínima (minimum power distortionless response - MPDR) (VAN TREES, 2002). Os beamformers adaptativos, por outro lado, adaptam-se aos dados recebidos e estimam as estatísticas ou, ao menos, um substituto adequado das mesmas (VAN TREES, 2002).

Estudos recentes têm empregado o ABF para controlar e suprimir interferências, conforme relatado em Zabelin e Litvinov (2023), Han, Ng e Er (2022), Ornelas-Gutierrez, Vargas-Rosales e Villalpando-Hernandez (2023), Wu et al. (2022) e Ge et al. (2020). Algoritmos ABF que utilizam os graus de liberdade restantes em restrições lineares para reduzir a interferência foram propostos em Miller e Spanias (2007). No entanto, um formador de feixe adaptativo geralmente não é orientado para controlar os níveis do lóbulo lateral (sidelobe level - SLL). O controle de SLL pode melhorar a relação sinal-ruído mais interferência (signal to interference plus noise ratio - SINR). Além disso, a minimização dos lóbulos laterais pode reduzir a suscetibilidade a interferências indesejadas de radiofrequência (KLINGELFUS; SERRANO; REHDER, 2021), sendo especialmente relevante em cenários onde um número considerável de novos interferentes é adicionado ao cenário eletromagnético (GRAVAS et al., 2019). Técnicas de otimização têm sido usadas para controlar o nível do lóbulo lateral e otimizar o diagrama de radiação, conforme relatado em Goudos, Rekanos e Sahalos (2008), Rekanos (2008), Al-Azza, Al-Jodah e Harackiewicz (2016) e Ebrahimzade, Abedi e Hesari (2016). O trabalho apresentado em Gravas et al. (2019) propõe um algoritmo que, paralelamente a uma técnica de formador de feixe adaptativo (adaptative ebamformer

- ABF), atinge um nível especificado de lóbulo lateral, resultando em uma melhoria da SINR. Este artigo explorou essa ideia, baseada na supressão de lóbulo lateral com posicionamento de nulos, aplicando-se a para formadores de feixe adaptativos e propondo novas abordagens que empregam algoritmos adaptativos com restrições lineares. A Seção II apresenta o modelo do sinal recebido em banda base complexa (complex baseband - CBB), juntamente com a arquitetura adotada do receptor do ponto de vista do processamento de sinais. Algumas informações básicas sobre processamento de sinais em arranjos também são discutidas. A Seção III revisa os fundamentos de filtros adaptativos e formadores de feixes com restrições lineares. A Seção IV propõe a utilização da técnica de null placement sidelobe suppression (NP-SLS) com o algoritmo de mínimos quadrados com restrição (Constrained Least Mean Squares - CLMS). A Seção V apresenta os resultados da simulação e respectiva análise. Por fim, a Seção VI tira as conclusões deste trabalho.

## 2. MODELO DO VETOR SNAPSHOT CBB

O processamento de sinais em arranjos é geralmente realizado utilizando sinais analíticos de banda estreita (*narrowband* – NB) ou sinais CBB (DINIZ et al., 2022). Assumindo uma condição de propagação de campo distante, os sinais NB proveniente de diferentes elementos do arranjo podem ser facilmente atrasados e alinhados no tempo, desde que a distância entre os elementos seja conhecida e os ângulos de chegada determinados com base em uma referência fixa.

#### 2.1. ARQUITETURA DE RECEPÇÃO

A Figura 1 exibe a arquitetura típica do receptor considerada neste trabalho.



Figura 1. Diagrama de blocos de uma arquitetura de receptor típica usada neste artigo.

Na cabeça de radio-frequência (RF), o sinal de banda estreita é convertido para uma frequência intermediária (*intermediate frequency* – IF) e encaminhado ao receptor digital, como em uma arquitetura básica de receptor heteródino (Razavi, 2011).

No receptor digital, o sinal analógico IF é amostrado em  $f_s$  no conversor analógico-digital (*analog to digital converter* – ADC), demodulado em fase e quadratura, processado por um filtro passa-baixa para manter apenas os produtos de baixa frequência e dizimado por um fator *R*, de modo que a frequência de amostragem final de *x*(*k*) seja  $2\Delta f$ , duas vezes a largura de banda do sinal.

### 2.2. MODELO DE SINAL DE RECEPTOR ÚNICO

O SDI de banda estreita recebido por um elemento do arranjo de antenas, com atraso entre elementos consecutivos e envolto em ruído aditivo, pode ser representado por  $x(t) = s(t - \Delta t) \cos(\Omega o(t - \Delta t)) + n(t)$ , onde  $\Delta t$  é o atraso devido à direção de chegada (*direction of arrival* – DOA),  $\Omega o = 2\pi f o$ , e n(t) é ruído Gaussiano branco. Depois de passar pela arquitetura do receptor mostrada na Figura 1, o sinal CBB de tempo discreto segue o modelo  $x(k) = x_1(k) + jx_Q(k) = s(k)e^{-j\Omega o\Delta t} + n(k)$ , onde  $x_1(k)$  e  $x_Q(k)$  são os componentes em fase e quadratura. Observe que a informação sobre o atraso de tempo,  $\Delta t$ , está presente na fase do sinal CBB.

### 2.3. MODELO DE SINAL DO ARRANJO DE ANTENAS

A Figura 2 ilustra um esquema de um arranjo de antenas onde M sinais, em um determinado instante de tempo discreto k, proveniente de M antenas conectadas a M receptores, passam por um processador de sinais de arranjo. Como cada sinal recebido por um elemento distinto do arranjo apresenta



**Figura 2.** Esquema de um conjunto de *M* antenas seguido por *M* receptores e um processador de sinais de arranjo.

um atraso diferente, o modelo de sinal para um arranjo de *M* elementos, assumindo a presença de um único emissor, é representado pela Equação 1:

$$\mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ \vdots \\ x_M(k) \end{bmatrix} = s(k) \underbrace{\begin{bmatrix} e^{-j\Omega_o\Delta t_1} \\ \vdots \\ e^{-j\Omega_o\Delta t_m} \\ \vdots \\ \underline{e^{-j\Omega_o\Delta t_m}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{a}(\theta)} + \underbrace{\begin{bmatrix} n_1(k) \\ \vdots \\ n_m(k) \\ \vdots \\ \underline{n_M(k)} \\ \mathbf{n}(k) \\ \vdots \\ \underline{n_M(k)} \end{bmatrix}}_{\mathbf{n}(k)}, \tag{1}$$

Esse modelo é conhecido na literatura como vetor *snapshot* (VAN TREES, 2002). O seu m-ésimo elemento do vetor é dado por  $x_m(k) = s(k)e^{-j\Omega_0\Delta t_m} + n_m(k)$  e  $\mathbf{a}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & e^{-\frac{j2\pi d\cos\theta}{\lambda}} & \dots & e^{-\frac{j2\pi(M-1)d\cos\theta}{\lambda}} \end{bmatrix}^T$ assumindo um arranjo linear uniforme (*uniform linear array* – ULA), é o vetor de direção (*steering vector* – SV) do SDI, contendo os atrasos de fase para cada elemento do arranjo. O SV depende da direção de chegada  $\theta$  e da geometria do arranjo.

Observe que a saída do processador é  $y(k) = \mathbf{w}^{\mathsf{H}}\mathbf{x}(k)$ , ou seja, o produto interno no domínio complexo do vetor de coeficientes e o vetor de sinal de tamanho M em um determinado instante de tempo discreto k.

 $\Delta t = d \cos(\theta)/c$ , onde *c* é a velocidade da luz no vácuo, *d* é a separação física entre os elementos da antena,  $\lambda = c/f_{o}$ é o comprimento de onda e *f*c é a frequência de operação. Considere agora o caso de *D* fontes diferentes, com  $D \le M$ , 1 SDI ( $\theta_1$ ) e *D* – 1 interferidores ( $\theta_2$  to  $\theta_D$ ), de modo que o modelo de sinal adotado é (Equação 2):

$$\mathbf{x}(k) = s_1(k)\mathbf{a}(\theta_1) + \dots + s_D(k)\mathbf{a}(\theta_D) + \mathbf{n}(k)$$
  
=  $\underbrace{[\mathbf{a}(\theta_1) \cdots \mathbf{a}(\theta_D)]}_{\mathbf{A} \text{ (matriz de direção)}} \underbrace{\begin{bmatrix} s_1(k) \\ \vdots \\ s_D(k) \end{bmatrix}}_{\mathbf{s}(k)} + \mathbf{n}(k)$  (2)  
=  $\mathbf{A}\mathbf{s}(k) + \mathbf{n}(k)$ ,

Onde:

**A**: a matriz de direção contendo os *D* vetores de direção para cada DOA.

## 3. FUNDAMENTOS DE FILTRAGEM ADAPTATIVA COM RESTRIÇÕES

Após serem recebidos e demodulados pelas arquiteturas representadas nas Figuras 1 e 2, os sinais são processados por um processador de sinais de arranjo, sendo w o vetor de coeficientes e y(k) =  $\mathbf{w}^{H}\mathbf{x}(k)$  sua saída em um determinado instante k. Uma vez que os formadores de feixe são essencialmente técnicas de filtragem espacial, o processador de sinais do arranjo deve reforçar o SDI ajustando o vetor de peso w de forma a atender ao critério sem distorção,  $\mathbf{w}^{H}\mathbf{a}(\theta_{1}) = 1$  (DINIZ, 2020). Isso significa garantir um ganho igual a um para o sinal na direção de interesse  $\theta_{1}$ , enquanto minimiza os sinais de outras direções.

## 3.1. FORMAÇÃO DE FEIXE ÓTIMA DE BANDA ESTREITA

Uma primeira abordagem possível para uma técnica de formação de feixe é minimizar a variância ou a energia do sinal de saída, expressa por  $E[|y(k)|^2] = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_x \mathbf{w}, \mathbf{R}_x = [E[\mathbf{x}(k)\mathbf{x}^H(k)],$ sujeito a  $\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_1) = 1$ . O resultado corresponde à MPDR:  $\mathbf{w}_{MPDR} = \frac{\mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{a}(\theta_1)}{\mathbf{a}^H(\theta_1)\mathbf{R}_x^{-1}\mathbf{a}(\theta_1)}$  que é baseado no conhecimento de  $\mathbf{R}_x =$  $\mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H + \mathbf{R}_n$ , onde  $\mathbf{R}_s = [E[\mathbf{s}(k)\mathbf{s}^H(k)] \in \mathbf{R}_n = [E[\mathbf{n}(k)\mathbf{n}^H(k)]$  são as matrizes de covariância de sinal e ruído (DINIZ *et al.*, 2022).

Ao minimizar a potência de saída  $\mathbf{w}^{H}\mathbf{R}_{x}\mathbf{w}$ , sujeito a  $\mathbf{C}^{H}\mathbf{w} = \mathbf{f}$ , o problema é apresentado de uma forma mais geral, onde  $\mathbf{C} = [\mathbf{a}(\theta_{1}) \cdots \mathbf{a}(\theta_{D})]$  é uma matriz de até *D* colunas contendo restrições lineares na forma de vetores de direção. O vetor  $\mathbf{f}$ , cujo comprimento é igual ao número de colunas de  $\mathbf{C}$ , corresponde ao número de restrições lineares, que podem ser customizadas dependendo da aplicação. Por exemplo,  $\mathbf{f} = [1 \ 0 \cdots 0]^{T}$ significa melhorar os sinais de  $\theta_{1}$  (SDI) e colocar nulos nas demais direções (interferidores).

Essa minimização resulta em  $\mathbf{w}_{\text{LCAF}} = \mathbf{R}_x^{-1}\mathbf{p} + \mathbf{R}_x^{-1}\mathbf{C}$  ( $\mathbf{C}^{\text{H}}\mathbf{R}_x^{-1}\mathbf{C}$ )<sup>-1</sup> ( $\mathbf{f} - \mathbf{C}^{\text{H}}\mathbf{R}_x^{-1}\mathbf{p}$ ), denominado filtro adaptativo linearmente restrito (*linearly constrained adaptive filter* – LCAF) (DINIZ *et al.*, 2022). Como em Diniz (2020) e Diniz *et al.* (2022), no caso em que um filtro linearmente restrito é aplicado ao formador de feixe, tem-se  $\mathbf{p} = \mathbf{E} [d^*(k) \mathbf{x}(k)] = 0$ , e como o sinal de referência é nulo, d(k) = 0.

O formador de feixe MPDR é um caso particular da expressão LCAF quando  $\mathbf{p} = 0$ ,  $\mathbf{C} = \mathbf{a}(\theta_1)$ , e  $\mathbf{f} = 1$ . Portanto, a teoria do LCAF possibilita impor restrições lineares fixas, seja para melhorar o SDI,  $\mathbf{w}^{H}\mathbf{a}(\theta_1) = 1$ , ou para colocar nulos em outras direções,  $\mathbf{w}^{H}\mathbf{a}(\theta) = 0$ .

## 3.2. FORMAÇÃO DE FEIXE ADAPTATIVO DE BANDA ESTREITA

Quando a matriz  $\mathbf{R}_x$  não está disponível, é possível estimá-la a partir dos *snapshots* disponíveis e realizar uma técnica de inversão de matriz amostral. Portanto, uma possível adaptação da solução MPDR é obtida substituindo  $\mathbf{R}_x$  por uma estimativa  $\hat{\mathbf{R}}_x$  resultando na solução de inversão de matrizes amostrais (*sample matrix inversion* – SMI) (VAN TREES, 2002):  $\mathbf{w}_{SMI} = \frac{\hat{\mathbf{R}}_x^{-1}a(\theta)}{a^{H}(\theta)\hat{\mathbf{R}}_x^{-1}a(\theta)}$ . Esse processador de dados em bloco também é conhecido como inversão direta de matriz (*direct matrix inversion* – DMI), ou técnica *estimate and plug* (VAN TREES, 2002).

Um ABF, por outro lado, se adapta em tempo real aos dados recebidos. Por exemplo, o algoritmo CLMS atualiza o vetor de coeficientes **w** a cada iteração, sujeito a  $C^{H}w = f$ , a fim de reforçar o SDI enquanto atenua possíveis interferidores de qualquer outra direção. A expressão de atualização do algoritmo CLMS é dada por:  $w(k + 1) = P[w(k) + \mu e^*(k)x(k)] + fc$ , onde  $e(k) = d(k) - w^H(k)x(k)$ , onde é o erro a priori,  $P = I_{MXM} - C(C^HC)^{-1}C^H$  é uma matriz de projeção, e  $f_c = C(C^HC)^{-1}f$  é um vetor quiescente  $M \times 1$  (DINIZ *et al.*, 2022). Observe que, para a aplicação em questão, d(k) = 0, e  $e(k) = -w^H(k)x(k)$ .

#### 3.3. O ALGORITMO NP-SLS MPDR

O NP-SLS MPDR é descrito no Algoritmo 1. Utilizando a matriz de covariância e o SV do SDI como entradas, e inicializando com o vetor de coeficientes MPDR, o algoritmo calcula o diagrama de feixe, *beampattern* (BP) MPDR. Depois disso, ele detecta o maior SLL e incorpora uma restrição adicional ao filtro adaptativo na forma de um SV na direção do lóbulo lateral (*sidelobe* – SL) detectado. Essa restrição adicional reduz o SLL detectado, alocando um nulo em sua direção. O processo é interrompido quando *SLL < SLL*<sub>win</sub>.

## 4. USANDO O ALGORITMO NP-SLS COM UM FILTRO ADAPTATIVO

Com o objetivo de controlar o SLL em combinação com um ABF, este artigo propõe o algoritmo NP-SLS CLMS. Aqui, vale ressaltar que o CLMS foi utilizado como exemplo, porém outras técnicas ABF podem ser utilizadas, como, por exemplo, o algoritmo *Constrained Normalized Least Mean Squares* (CNLMS).

O objetivo do NP-SLS é receber o vetor de coeficientes atualizado  $\mathbf{w}_{\rm B}$  do ABF, juntamente com os vetores de restrição em C e f. Depois disso, o algoritmo detecta o lóbulo lateral de

maior nível e incorpora um SV para a direção do SL como uma restrição linear adicional ao filtro adaptativo linear. Isso origina um vetor de peso atualizado  $\mathbf{w}_A$ . A Figura 3 representa o problema em uma perspectiva geométrica. O hiperespaço  $\mathcal{H}_0$  contém os vetores que estão sujeitos a  $\mathbf{C}^{\mathrm{H}}\mathbf{w} = \mathbf{f}$ , ou seja, os vetores  $\mathbf{w}_{\mathrm{B}}$  que incorporam as restrições do ABF.

Algoritmo 1: O Formador de Feixe NP-SLS MPDR **Dados de Entrada:**  $\mathbf{R}_{x} \triangleright$  Matriz de Covariância dos Snapshots  $\mathbf{a}(\theta_1) \triangleright$  Vetor de Direção do SDI Inicialização:  $\mathbf{R}_x^{-1}\mathbf{a}(\theta_1)$ 
$$\begin{split} \mathbf{w}_{\mathrm{MDPR}} &= \frac{\mathbf{k}_{x} \ \mathbf{a}_{(\sigma_{1})}}{\mathbf{a}^{\mathrm{H}}(\theta_{1})\mathbf{R}_{x}^{-1}\mathbf{a}(\theta_{1})} \\ & \mathsf{BPMPDR}(\theta) = |\mathbf{w}_{\mathrm{MDPR}}^{\mathrm{H}}\mathbf{a}(\theta)| \end{split}$$
 $\triangleright \forall \theta \in região$ visível A partir dos picos do BPMPDR( $\theta$ ), encontre SLL e  $\theta_{\rm SLL}$  $\mathbf{w}_{\text{NP-SLS}} \leftarrow \mathbf{w}_{\text{MDPR}}$ Escolha: SLL<sub>min</sub> enquanto  $SLL > SLL_{min}$  faça  $\mathbf{w}_{\mathrm{NP-SLS}} \leftarrow \mathbf{R}_{x}^{-1} \mathbf{C} \left( \mathbf{C}^{\mathrm{H}} \mathbf{R}_{x}^{-1} \mathbf{C} \right)^{-1} \mathbf{f}$  $BPNPSLS(\theta) = |\mathbf{w}_{NP-SLS}^{H} \mathbf{a}(\theta)|$ A partir dos picos do BPNPSLS( $\theta$ ), encontre SLL e  $\theta_{\rm SLL}$  $\mathbf{C} \leftarrow [\mathbf{C} \ \mathbf{a}(\theta_{\mathrm{SLL}})]$  $\mathbf{f} \leftarrow \begin{bmatrix} \mathbf{f}^{\mathrm{T}} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$ fim



Figura 3. Nas iterações do algoritmo NP-SLS, quando usado com um formador de feixe adaptativo, nossa abordagem envolve a atualização iterativa dos coeficientes do vetor anterior (B como *before*)  $w_B \in \mathcal{H}_0$ em direção ao vetor mais próximo (A como em *after*) tal que  $w_A \in \mathcal{H}_0 \cap \mathcal{H}_1$ , a interseção dos hiperespaços  $\mathcal{H}_0 \in \mathcal{H}_1$ .

O hiperespaço  $\mathcal{H}_1$  contém os vetores sujeitos a  $\mathbf{a}_{\theta_A}^H \mathbf{w} = 0$ , ou seja, os vetores  $\mathbf{w}$  que resultam em um BP com nulo na direção  $\theta_A$ . O objetivo, do ponto de vista geométrico, é encontrar o vetor que minimize a distância entre  $\mathbf{w}_B e \mathbf{w} \in \mathcal{H}_0 \cap \mathcal{H}_1$ (B significa *Before* e A significa *After*), também conhecido como perturbação mínima. Para derivar uma expressão de atualização para essa etapa, definimos uma matriz de restrição adicional, denotada como  $\mathbf{C}_A = [\mathbf{C} \ \mathbf{a}_{\theta_A}]$ . A expressão para  $\mathbf{w}_A$  é então obtida minimizando a seguinte função objetivo, sujeita a um conjunto de equações lineares (Equação 3):

$$\min_{\mathbf{w}} \|\mathbf{w} - \mathbf{w}_{\mathrm{B}}\|^{2} \text{ subject to } \mathbf{C}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{H}} \mathbf{w} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$
(3)

Aplicandoos multiplicadores de Lagrange e realizando manipulações algébricas, o resultado é apresentado a seguir.

Por questões de brevidade, os detalhes das etapas intermediárias foram omitidos (Equação 4).

$$\mathbf{w}_{\mathrm{A}} = \frac{1}{2}\mathbf{w}_{\mathrm{B}} + \frac{1}{2}\mathbf{C}_{\mathrm{A}}(\mathbf{C}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{H}}\mathbf{C}_{\mathrm{A}})^{-1}[\mathbf{C} - \mathbf{a}_{\theta_{\mathrm{A}}}]^{\mathrm{H}}\mathbf{w}_{\mathrm{B}}.$$
 (4)

#### 4.1. O ALGORITMO NP-SLS CLMS

O NP-SLS CLMS, Algoritmo 2, é uma solução proposta para o ABF CLMS. Ele utiliza o Algoritmo 3 como uma função. Com base nas restrições, ele calcula a matriz de projeção CLMS e o vetor de pesos quiescente,  $f_c$ , como inicialização. Depois disso, o vetor de peso do CLMS é atualizado a cada *snapshot* de cada iteração, até o final de um bloco de amostra contendo *K snapshots*. Quando *K* é alcançado, são apontadas duas possíveis versões para esse algoritmo. Na versão 1, o Algoritmo 3 é chamado para realizar o controle do SLL, retornando o vetor de pesos atualizado e mantendo a restrição única dada pelo SV do SDI. Na versão 2, o Algoritmo 3 é chamado para realizar a redução do SLL; entretanto ela retorna todas as restrições adicionais geradas pelo Algoritmo 3 e não apenas a restrição do SV do SDI. O algoritmo 2 apresenta ambas as versões.

#### **5. RESULTADOS**

Para avaliar o desempenho dos algoritmos propostos, dois sinais estacionários foram gerados e processados seguindo os parâmetros do modelo de sinal proposto e a arquitetura ilustrada na Figura 1. A distância entre antenas do arranjo foi definida como  $d = \lambda/2$ . Em um primeiro experimento com o algoritmo NP-SLS MPDR, o SDI foi fixado em 45, enquanto o interferidor variou de 0° a 30° e de 60° a 180°, representando, respectivamente, interferidores angularmente próximos e distantes, porém não muito próximos ao SDI. Os resultados desse experimento estão representados nas Figuras 4 e 5. Na Figura 4, o gráfico exibe o



**Figura 4.** Análise do intervalo de confiança do algoritmo NP-SLS MPDR. O SDI é fixado em 45º e o interferidor varia de 0º a 30º e de 60º a 180º, representando os casos de DOAs do interferidor não muito próximos ao DOA do SDI. O gráfico exibe o nível mais baixo de SLL alcançado *versus* o número *M* de elementos do arranjo.



**Figura 5.** Análise do intervalo de confiança do algoritmo NP-SLS MPDR. O SDI é fixado em 45º e o interferidor varia de 0º a 30º e de 60º a 180º, representando os casos de DOAs do interferidor não muito próximos ao DOA do SDI. o gráfico exibe o número de iterações necessárias para obter SLLmin *versus* M. menor nível de SLL alcançado en função do número de elementos M do arranjo. Pode-se verificar que a atenuação de SL aumenta drasticamente com o aumento de M. No entanto, mesmo para valores baixos de M, como M = 8, obtém-se uma atenuação de SL razoável, com um SLL oscilando aproximadamente entre -12 e -20 dB. A variação de SLL pode ser considerada grande para M inferiores, ficando ligeiramente fora do intervalo de confiança de 95% para  $M \le 30$ . Na Figura 5, o gráfico exibe o número de iterações necessárias para obter SLLmin *versus* M. Nota-se que a quantidade de iterações diminui com o aumento de M. Entretanto, nem mesmo para valores maiores de M é respeitado o intervalo de confiança de 95% para atingir o SLL mínimo. A confiança para o nível mais baixo de SLL alcançado para valores mais baixos de M é baixa, mas aumenta significativamente com o número de elementos do arranjo.

Algoritmo 2: O Algoritmo CLMS com NP-SLS				
<b>Dados de Entrada:</b> $\mathbf{x}(k)$	▷ Snapshots			
Inicialização:				
$\mathbf{C} = \mathbf{a}(\theta_1)$	$\triangleright \theta_1$ é a DOA do SDI			
$\mathbf{f} = 1$	Critério Sem Distorção			
$\mathbf{P} = \mathbf{I}_{M \times M} - \mathbf{C}(\mathbf{C}^{\mathrm{H}}\mathbf{C})$	$\mathbb{C})^{-1}\mathbf{C}^{\mathrm{H}} \triangleright M \text{ sensores}$			
$\mathbf{f}_{\mathrm{c}} = \mathbf{C} (\mathbf{C}^{\mathrm{H}} \mathbf{C})^{-1} \mathbf{f}$	▷ Vetor de pesos quiescente			
$\mathbf{w}(k) = \mathbf{f}_c$				
<b>Escolha:</b> $\mu$ (passo) e K (b	ploco de amostras)			
para cada $k$ faça				
$y(k) = \mathbf{w}^{\mathrm{H}}(k)\mathbf{x}(k)$				
e(k) = 0 - y(k)				
$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{P}\left[\mathbf{w}(k) + \right]$	$-\mu e^*(k)\mathbf{x}(k)] + \mathbf{f}_c$			
se $mod(k,K) = 0$ faça				
Versão 1:				
$\mathbf{w}(k+1) \leftarrow \mathbf{Algori}$	itimo 3( $w(k+1), a(\theta_1), 1$ )			
Versão 2:				
$[\mathbf{w}(k+1), \mathbf{C}, \mathbf{f}] \leftarrow$				
Algoritmo $3(\mathbf{w}(k+1), \mathbf{a})$	$(\theta_1), 1)$			
$\mathbf{P} = \mathbf{I}_{M \times M} - \mathbf{C}(0)$	$C^{H}C)^{-1}C^{H}$			
$\mathbf{f}_{c} = \mathbf{C} (\mathbf{C}^{H} \mathbf{C})^{-1} \mathbf{f}$				
fim				
fim				
Algoritmo 3: O Algoritmo	NP-SLS aplicado em um			
1.00				

```
ABF
   Dados de Entrada: w<sub>ABF</sub>, C e f
  Inicialização:
             BPABF(\theta) = |\mathbf{w}_{ABF}^{H} \mathbf{a}(\theta)| \quad \triangleright \forall \theta \in região visível
             A partir dos picos do BPABF(\theta), encontre SLL e
    \begin{array}{c} \theta_{\mathrm{SLL}} \\ NrLoops \leftarrow 0 \end{array}
  Escolha: SLL<sub>min</sub>
   enquanto SLL > SLL_{min} faça
              NrLoops \leftarrow NrLoops + 1
             \mathbf{C}_{\mathrm{A}} \leftarrow [\mathbf{C} \ \mathbf{a}(\underline{\theta}_{\mathrm{SLL}})]
             \mathbf{f}_{A} \leftarrow \begin{bmatrix} \mathbf{f}^{T} & 0 \end{bmatrix}
             \mathbf{w}_{\text{NP-SLS}} \leftarrow \frac{1}{2} \mathbf{w}_{\text{ABF}} + \cdots
            \frac{\frac{1}{2}\mathbf{C}_{A}\left(\mathbf{C}_{A}^{H}\mathbf{C}_{A}\right)^{-1}\left[\mathbf{C}-\mathbf{a}(\theta_{SLL})\right]^{H}\mathbf{w}_{ABF}}{BPNP-SLS(\theta) = |\mathbf{w}_{NP-SLS}^{H}\mathbf{a}(\theta)|}
             BPNP-SLS(\theta) = |\mathbf{w}_{NP-SLS}^{H} \mathbf{a}(\theta)|
A partir dos picos do BPNP-SLS(\theta), encontre SLL
     e \theta_{\rm SLL}
             \mathbf{C} \leftarrow \mathbf{C}_{A}
             \mathbf{f} \leftarrow \mathbf{f}_A
  fim
  Retorna: w<sub>NP-SLS</sub>
```

Para os experimentos a seguir, o ULA simulado possui M = 8 antenas. As Figuras 6, 7, 8 e 9 descrevem o desempenho do BP dos algoritmos NP-SLS CLMS para um bloco de 23.000 *snapshots*, inicializado com o vetor de peso quiescente (f.).

Como pode ser visto na Figura 6, o algoritmo CLMS foi inicializado com o vetor de peso quiescente que, para esse exemplo, possui um lóbulo lateral na direção do interferente. Na Figura 7, após K = 23.000 *snapshots*, o algoritmo CLMS converge para um diagrama de feixe bastante próximo



**Figura 6.** Diagrama de Feixe do vetor de coeficientes CLMS quando inicializado com o vetor quiescente em comparação com o MPDR.



**Figura 7.** Diagrama de Feixe do vetor de coeficientes CLMS ao final do primeiro bloco com 23.000 *snapshots*, antes e depois do NP-SLS.

à solução MPDR, apresentando uma significativa atenuação na direção do interferidor. Observa-se ainda que, após a aplicação do NP-SLS, o nível dos lóbulos laterais diminui às custas de um aumento na largura do feixe do lóbulo principal.

As Figuras 8 e 9 retratam o comportamento das versões 1 e 2 do algoritmo NP-SLS CLMS ao final do segundo bloco, após k = 2K snapshots. Ambas as versões demonstram pouca alteração em seu diagrama de feixe desde o início do bloco e atenuam claramente o DOA do interferidor. A versão 1,



**Figura 8.** Diagrama de Feixe do vetor de coeficientes CLMS Versão 1 ao final do segundo bloco com 23.000 *snapshots*, em comparação com o MPDR.



Figura 9. Diagrama de Feixe do vetor de coeficientes CLMS Versão 2 ao final do segundo bloco com 23.000 *snapshots*, em comparação com o NP-SLS MPDR.

porém, mantendo apenas a resposta sem distorção, convergiria novamente para a solução MPDR, caso fossem utilizados mais *snapshots*. A versão 2 não convergiria para a solução MPDR, mas sim para a solução NP-SLS MPDR, que consiste no MPDR com o SV do SDI e 4 restrições adicionais dos 4 lóbulos laterais atenuados quando k = K. De maneira geral, ambas as versões atenuaram os lóbulos laterais acima de -17 dB, mantendo o nulo no interferidor e nenhuma atenuação (ganho unitário) no SDI.

A Figura 10 representa o desempenho em termos de SINR dos algoritmos NP-SLS CLMS, versões 1 e 2, para os 23.000 snapshots dos blocos 1 e 2, conforme descrito nas Figuras 8 e 9. A Figura 11 apresenta a norma quadrática dos desvios dos vetores de coeficientes: wCLMS1 e wCLMS2 para o NP-SLS CLMS versões 1 e 2, wMPDR para o MPDR e wNP-SLS para o algoritmo NP-SLS MPDR. Conforme observado na Figura 10, no bloco 1, o SINR aumenta tanto para o NP-SLS CLMS Versão 1 quanto para o Versão 2 no mesmo ritmo, uma vez que são idênticos neste primeiro bloco. No bloco 2, após a supressão dos lóbulos laterais, ambas as versões apresentam um degrau negativo em torno de 0,6 dB. Ainda na Figura 10, é possível notar que, após a supressão do lóbulo lateral, o SINR das versões 1 e 2 aumenta, o primeiro em uma taxa mais rápida que o segundo. Eles mostram, no entanto, uma taxa de aumento de SINR menor do que antes da supressão do SL (no primeiro bloco).



**Figura 10.** SINR para algoritmos NP-SLS CLMS Versões 1 e 2 para 2 blocos de 23.000 *snapshots versus* a MPDR e o NP-SLS MPDR.

Dados mais *snapshots*, a Versão 1 convergiria para MPDR, enquanto a Versão 2 convergiria para o já bastante próximo NP-SLS MPDR com os 4 nulos das restrições.

Na Figura 11, observa-se que, no primeiro bloco, os desvios do vetor de coeficientes das Versões 1 e 2 para o MPDR diminuem e convergem para zero. No segundo bloco, após a supressão do lóbulo lateral, o desvio da Versão 1 para a MPDR aumenta em um grau positivo e começa a diminuir, chegando a zero após tempo suficiente. Esse comportamento é coerente com a versão 1, como na Figura 10: aumento de SINR e convergência futura para a MPDR com mais *snapshots*.

O desvio do vetor de coeficientes da versão 2, após a supressão de SL, é comparado agora com NP-SLS MPDR devido às suas restrições adicionais e não mais ao MPDR somente com a resposta sem distorção. Ele atinge zero logo após a supressão do SLL.

A Figura 12 representa o desempenho SINR e a norma quadrática do desvio dos vetores de coeficientes dos algoritmos NP-SLS CLMS para blocos mais curtos de 250 *snapshots*. Como pode ser visto na Figura 12, o SINR não aumenta significativamente no bloco 1 devido ao curto intervalo de tempo.

Porém, no bloco 2, após a supressão dos lóbulos laterais, ambas as versões apresentam um aumento significativo na SINR em torno de 3,8 dB. O diagrama de feixe para K= 250 (não mostrado aqui) é o mesmo que o das Figuras 8 e 9 para



Figura 11. Norma quadrática do desvio de coeficientes para algoritmos NP-SLS CLMS Versões 1 e 2 para 2 blocos de 23.000 *snapshots versus* a MPDR e o NP-SLS MPDR.



Figura 12. SINR para algoritmos NP-SLS CLMS versões 1 e 2 para 2 blocos de 250 *snapshots versus* a MPDR e o NP-SLS MPDR

as versões 1 e 2. Portanto, o NP-SLS melhora a SINR em cenários onde o intervalo de tempo é muito curto para que o CLMS alcance a convergência completa. Como pode ser visto na Figura 13, no primeiro bloco, os desvios do vetor de coeficientes das versões 1 e 2 para a MPDR não diminuem devido ao curto espaço de tempo.

No segundo bloco, após a supressão do lóbulo lateral, o desvio da Versão 1 para o MPDR aumenta e reduziria com tempo suficiente. O desvio da versão 2 para o NP-SLS MPDR já é zero desde o início do segundo bloco. Finalmente, as descobertas das Figuras 10 a 13 acima apontam que, no caso de um bloco de amostra mais longo (por exemplo, 23.000 *snap-shots*), a supressão do lóbulo lateral tem o custo de reduzir a SINR global, em nosso exemplo, em pelo menos 0,6 dB, além de possivelmente diminuir a convergência. No entanto, no caso de um bloco de amostra mais curto (por exemplo, 250 *snapshots*), a supressão do lóbulo lateral melhoraria a SINR quando o ABF ainda não convergisse. Em outras palavras, há uma compensação entre a SINR global e a velocidade de convergência *versus* a redução da influência de interferentes inesperados nos lóbulos laterais.



Figura 13. Norma quadrática do desvio de coeficientes para algoritmos NP- SLS CLMS versões 1 e 2 para 2 blocos de 250 *snapshots versus* a MPDR e o NP-SLS MPDR.

## 6. CONCLUSÃO

Este artigo investigou uma técnica de alocação de nulos para supressão de lóbulos laterais em combinação com comformadores de feixe adaptativos, propondo novas abordagens que empregam algoritmos adaptativos com restrições lineares, aplicáveis a receptores de guerra eletrônica. A abordagem NP-SLS apresentada neste trabalho incorpora restrições lineares ao algoritmo CLMS, colocando nulos nos lóbulos laterais detectados acima de um nível mínimo especificado. Os resultados simulados demonstram a eficácia da abordagem proposta no controle do SLL e seu efeito na supressão adaptativa de interferência, considerando diferentes números de antenas, porém às custas de uma convergência mais lenta. Para blocos mais longos, detectou-se uma pequena redução global da SINR, enquanto para blocos mais curtos, a supressão do lóbulo lateral melhora a SINR, proporcionando maior rejeição de sinais e interferências indesejadas. O estudo pode ser útil para pesquisas futuras em formação de feixe adaptativo com controle aprimorado dos lóbulos laterais.

## REFERÊNCIAS

AL-AZZA, A. A.; AL-JODAH, A. A.; HARACKIEWICZ, F. J. Spider monkey optimization: a novel technique for antenna optimization.

*IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 15, p. 1016-1019, 2016. https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2490103

#### Vitor Teixeira Klingelfus, José Antonio Apolinário Jr., Cláudio Augusto Barreto Saunders Filho, Rodrigo Caiado de Lamare

DINIZ, P. S. R. Adaptive filtering, algorithms and practical implementation. Berlim: Springer, 2020.

DINIZ, P. S. R.; CAMPOS, M. L. R. de; MARTINS, W. A.; LIMA, M. V. S.; APOLINÁRIO Jr., J. A. *Online learning and adaptive filters*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. https://doi.org/10.1017/9781108896139

EBRAHIMZADE, A.; ABEDI, H.; HESARI, M. Gravitational search algorithm used to synthesis a planar array antenna for nulling control and sidelobe level reduction. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TELECOMMUNICATIONS, 8., 2016, Tehran. *Anais* [...]. Irã, 2016. p. 391-395. https://doi.org/10.1109/ISTEL.2016.7881848

GE, Q.; ZHANG, Y.; WANG, Y.; ZHANG, D. Multi-constraint adaptive beamforming in the presence of the desired signal. *IEEE Communications Letters*, v. 24, n. 11, p. 2594-2598, nov. 2020. https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3006506

GOUDOS, S. K.; REKANOS, I. T.; SAHALOS, J. N. EMI reduction and ICs optimal arrangement inside high-speed networking equipment using particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 50, n. 3, p. 586-596, ago. 2008. https://doi.org/10.1109/TEMC.2008.924389

GRAVAS, I. P.; ZAHARIS, Z. D.; YIOULTSIS, T. V.; LAZARIDIS, P. I.; XENOS, T. D. Adaptive beamforming with sidelobe suppression by placing extra radiation pattern nulls. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 67, n. 6, p. 3853-3862, jun. 2019. https://doi. org/10.1109/TAP.2019.2905709

HAN, J.; NG, B. P.; ER, M. H. An adaptive orientational beamforming technique for narrowband interference rejection. *In*: IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2022, Singapore. *Anais* [...]. 2022. p. 4908-4912. https://doi.org/10.1109/ ICASSP43922.2022.9746844

KLINGELFUS, V. T.; SERRANO, A. L. C.; REHDER, G. P. Co-site interference study and mitigation onboard a submarine between

communication and positioning systems at L band. *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*, v. 3, n. 1, p. 38-42, mar. 2021. https://doi.org/10.1109/LEMCPA.2020.3044863

MILLER, S. R.; SPANIAS, A. Adaptive antenna beamforming using quiescent pattern control. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 6, p. 651-654, 2007. https://doi.org/10.1109/ LAWP.2007.913327

ORNELAS-GUTIERREZ, A.; VARGAS-ROSALES, C.; VILLALPANDO-HERNANDEZ, R. Vehicular Ad Hoc network interference mitigation using digital beamforming approach in roundabout scenarios. *IEEE Access*, v. 11, p. 108232-108244, 2023. https://doi.org/10.1109/ ACCESS.2023.3321567

RAZAVI, B. RF Microelectronics. Saddle River: Prentice Hall Press, 2011.

REKANOS, I. T. Shape reconstruction of a perfectly conducting scatterer using differential evolution and particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 46, n. 7, p. 1967-1974, jul. 2008. https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.916635

VAN TREES, H. L. *Detection, estimation, and modulation theory*. Part IV: Optimum array processing. Nova York: John Wiley & Sons, 2002.

WU, Z.; ZHU, S.; XU, J.; LAN, L.; ZHANG, M.; LI, X. A robust interference suppression method based on FDA-MIMO radar. 2022. In: 5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION COMMUNICATION AND SIGNAL PROCESSING (ICICSP), 2022, Shenzhen. *Anais* [...]. 2022. p. 419-423. https://doi.org/10.1109/ ICICSP55539.2022.10050656

ZABELIN, A. N.; LITVINOV, O. S. Recurrent neural network application features to suppress non-stationary interference in an adaptive antenna array. *In*: WAVE ELECTRONICS AND ITS APPLICATION IN INFORMATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS, 2023, St. Petersburg. *Anais* [...]. 2023. https://doi.org/10.1109/ WECONF57201.2023.10147941

# APLICAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAIS DE ALTO DESEMPENHO

Application of artificial intelligence in the analysis of the mechanical behavior of high-performance materials

Felipe Biermann Krusche<sup>1</sup>

Resumo: Em diversos campos da engenharia, a capacidade de prever com precisão o comportamento mecânico é crucial para garantir a integridade e a performance dos componentes estruturais. No entanto, as abordagens tradicionais muitas vezes enfrentam limitações ao lidarem com a complexidade e a variabilidade dos comportamentos dos materiais, resultando em estruturas excessivamente conservadoras, elevando custos e muitas vezes inviabilizando projetos. Este trabalho apresenta um método inovador que utiliza técnicas de inteligência artificial, especificamente algoritmos genéticos e a lógica fuzzy, integrados ao método de elementos finitos, para melhorar a previsão do comportamento mecânico de compósitos laminados. Essas técnicas oferecem uma análise mais detalhada das propriedades dos materiais e das incertezas associadas, potencialmente revolucionando os processos de design e controle de qualidade ao fornecer soluções mais precisas e econômicas. Palavras-chave: Propagação de incertezas. Comportamento mecânico. Inteligência artificial. Algoritmos genéticos. Lógica fuzzy. Análise de materiais.

**Abstract:** In materials engineering, the ability to accurately predict the propagation of uncertainties is crucial for ensuring the integrity and performance of structural components. However, traditional approaches often face limitations when dealing with the complexity and variability of material behaviors, resulting in excessively conservative structures. This work presents an innovative method that uses artificial intelligence techniques, specifically genetic algorithms and fuzzy logic, integrated with the finite element method, to improve the prediction of mechanical behavior in laminated composites. These techniques provide a more detailed analysis of material properties and associated uncertainties, potentially revolutionizing design and quality control processes by offering more precise and cost-effective solutions.

Keywords: Uncertainties propagation. Mechanical behavior. Artificial intelligence. Genetic algorithms. *Fuzzy* logic. Material analysis.

1. Capitão de Corveta. Engenheiro Químico. Mestre em Tecnologia Nuclear pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Encarregado da Divisão de Engenharia de Processos Industriais da Diretoria de Desenvolvimento Nuclear da Marinha, São Paulo, SP - Brasil. E-mail: felipebk@yahoo.com.br

## **1. INTRODUÇÃO**

Em diversos campos da engenharia, projetos complexos exigem o desenvolvimento de materiais de alto desempenho com características únicas, ajustadas às necessidades específicas de cada aplicação. Materiais poliméricos têm emergido como alternativas viáveis aos tradicionais metais e cerâmicas (CHAWLA, 2013). Os materiais compósitos, particularmente, oferecem uma ampla gama de benefícios significativos, como redução de peso, maior resistência mecânica e rigidez aprimorada. Além disso, destacam-se por sua superioridade em resistência à fadiga, corrosão e atrito, e também proporcionam excelentes propriedades de isolamento térmico e elétrico (BARBERO, 2010).

A atratividade dos materiais compósitos reside na flexibilidade de personalização de suas propriedades mecânicas, alcançada por meio da manipulação de variáveis de projeto, uma característica que outros materiais não oferecem. Assim, os compósitos podem ser otimizados para atender aos requisitos específicos de cada aplicação, fornecendo soluções altamente adaptadas que se ajustam com precisão às exigências de desempenho, durabilidade e funcionalidade. No entanto, a fabricação de compósitos com exatidão é um desafio significativo. A complexidade do processo de fabricação está associada a vários fatores que podem impactar a precisão e a qualidade do material final. Imperfeições comuns incluem variações na orientação das fibras e na proporção entre fibra e matriz, problemas de homogeneidade e qualidade da matriz e das fibras e falhas na mistura ou aplicação da matriz, que podem resultar em bolhas, descontinuidades ou excesso de porosidade (DEY; MUKHOPADHYAY; ADHIKARI, 2018). Apesar dos rigorosos controles de qualidade, essas variações são inevitáveis e podem afetar substancialmente as propriedades mecânicas do compósito. Assim, é essencial considerar essas variabilidades na fase de projeto, seja por meio de margens de segurança, seja por meio de técnicas de confiabilidade ou quantificação de incertezas (AWRUCH, 2016).

Várias são as formas possíveis de realizar as incertezas, porém os métodos tradicionais apresentam várias limitações (DEY; MUKHOPADHYAY; ADHIKARI, 2018; SCARTH; ADHIKARI, 2017). Abordagens não probabilísticas, como a lógica *fuzzy*, estão ganhando crescente atenção (ZHANG, 2005). Na análise de incertezas de materiais compósitos, a lógica *fuzzy* desempenha um papel crucial ao lidar com a variabilidade e a imprecisão associadas às propriedades dos materiais. A abordagem *fuzzy* permite representar as incertezas nas características dos compósitos, como resistência, rigidez e propriedades de interface, por meio de conjuntos *fuzzy* e funções de pertinência. Em vez de tratar esses parâmetros como valores exatos, a lógica *fuzzy* os modela como intervalos ou categorias que refletem a variação esperada e as limitações na medição desses parâmetros.

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo principal deste trabalho é apresentar e explorar como técnicas de inteligência artificial, especificamente os algoritmos genéticos e a lógica *fuzzy*, podem ser aplicadas para analisar o comportamento mecânico de materiais compósitos perante as incertezas nos seus parâmetros de engenharia. Os objetivos específicos deste trabalho são:

- propor um método para analisar a resposta de uma estrutura de material compósito laminado contendo incertezas em seus parâmetros de entrada;
- propor a representação de incertezas utilizando a lógica fuzzy;
- apresentar como os algoritmos genéticos podem ser utilizados otimizar as análises de intervalos de resposta *fuzzy*; e
- analisar o deslocamento central e o intervalo de resposta para diferentes orientações das fibras de uma placa de material compósito laminado.

### **3. METODOLOGIA**

#### 3.1. MODELAGEM DE INCERTEZAS EM MATERIAIS COMPÓSITOS

Antes de passar para o desenvolvimento dos aspectos teóricos da metodologia desenvolvida, cabe ressaltar que as incertezas em materiais compósitos podem ser modeladas tanto por uma abordagem probabilística como por uma não probabilística. A escolha recai muitas vezes sobre a disponibilidade de dados experimentais, uma vez que a construção de modelos probabilísticos, em geral, é dependente

de grandes volumes de dados, que são caros e os custos computacionais para seu processamento são altos (DEY; MUKHOPADHYAY; ADHIKARI, 2018; SCARTH; ADHIKARI, 2017). Neste item, será apresentada a resolução de um problema utilizando a técnica probabilística de Monte Carlo, uma das mais amplamente utilizadas no estudo da propagação de incertezas, e posteriormente será descrita a técnica não probabilística utilizada neste trabalho, a análise de intervalos baseada na lógica fuzzy, que, conforme Möller e Beer (2004), é mais adequada quando não se tem informações suficientes sobre as incertezas. Para comparar o resultado dos dois métodos, será utilizado o estudo realizado por Almeida e Awruch (2009). Assim, considerando--se o sistema linear Az = b, em que os parâmetros tenham um intervalo de variação e se deseje obter o intervalo de variação da saída z, obtém-se:

[2, 3]	[0, 1]	$z_1$	_	[0,120]
[1, 2]	[2, 3]	$z_2$	_	[60, 240]

A Figura 1 apresenta o resultado das simulações pelos dois métodos e pela solução exata do problema.

Para um mesmo número de tentativas, percebe-se que o método de análise de intervalos teve mais êxito em encontrar os valores extremos do problema. Ou seja, a análise de intervalos por otimização é computacionalmente mais eficiente que o método de Monte Carlo, uma vez que, para

250 250 200 200 150 150 100 100 S. S. 50 50 0 0 -50-50-100-100-1000 100 -100100 **Z**1 *z*1 Solução exata Análise de intervalos Simulação de Monte Carlo

Figura 1. Comparação entre a análise de intervalos e Monte Carlo.

que este método possa encontrar todos os pontos extremos do problema, são necessárias mais iterações que no método de análise de intervalos. Além desse exemplo, foi realizada uma comparação do desempenho das duas metodologias em prever como uma placa formada por lâminas de material compósito responde, em relação ao deslocamento central, na presença de incertezas nos ângulos de orientações das fibras de cada camada. Neste caso foram realizadas 200 análises utilizando o método de análise de intervalos e 5 mil simulações utilizando o método de Monte Carlo. Por meio da Figura 2, verifica-se que o método de Monte Carlo não conseguiu encontrar os extremos de resposta que a placa pode apresentar, mesmo tendo realizado um número significativamente maior de análises.

## 3.2. FORMULAÇÃO DOS CONJUNTOS *FUZZY*

Na teoria tradicional dos conjuntos numéricos (*crisp*), os elementos são claramente categorizados como pertencentes ou não a um conjunto e são definidos por uma fronteira precisa. Em contraste, a teoria dos conjuntos *fuzzy* permite que o nível de pertencimento de um elemento seja gradual, capturando incertezas e graduações. Isso reflete uma abordagem mais flexível, em que a fronteira do conjunto é difusa e pode variar, oferecendo uma representação mais rica e realista da complexidade do mundo.

O conceito de conjuntos *fuzzy* descreve uma gama de estados intermediários entre membros e não membros por meio de uma função de pertinência ( $\mu_{\hat{A}(x)}$ ). Essa função quantifica o grau em que os elementos do domínio pertencem ao



**Figura 2.** Extremos de resposta pelo método proposto e Monte Carlo.

conjunto *fuzzy* Ã(ZADEH, 1975). Dessa forma o conjunto *fuzzy* Ã pode ser representado por pares de pontos (x,  $\mu_{\tilde{A}(x)}$ ), em que o primeiro valor representa o elemento e o segundo valor indica o grau de pertencimento ao conjunto, conforme ilustrado na Equação 1.

$$\tilde{A} = \{x, \mu_{\tilde{A}}(x)\}, x \in X$$
(1)

#### Nesta equação:

X: todos os possíveis valores que x pode assumir e é chamado de Universo de Discurso.

A Figura 3 ilustra uma função de pertinência triangular, um tipo específico de função usada na lógica *fuzzy* para descrever o grau de pertencimento de um elemento a um conjunto difuso. A função de pertinência triangular é representada por um triângulo no gráfico da função e é definida por três parâmetros principais:  $x_L, x_M e x_U$ , de modo que  $x_L < x_M$  $< x_U$ , representando os valores inferior, médio e superior, respectivamente, que a variável *x* pode assumir. O valor central representa o ponto em que o elemento tem a maior aderência ao conjunto difuso.

Verifica-se ainda, na mesma figura, a existência de um corte horizontal em  $y = \alpha$ . Este corte, chamado de corte- $\alpha$ , define um intervalo de variação para a variável *x*. Cortes- $\alpha$  mais baixos introduzem maiores variações (ou incertezas) e cortes maiores, menores variações. Neste caso, *x* pode assumir valores entre  $x_{\alpha\alpha}$  e  $x_{\alpha\alpha}$ .

Para analisar a propagação de incertezas em sistemas com parâmetros representados por números *fuzzy*, utiliza-se



Figura 3. Função de Pertinência Retangular.

o método de decomposição de cortes- $\alpha$ . Este procedimento, também conhecido como otimização de cortes- $\alpha$ , envolve a análise de intervalos em diferentes níveis de cortes- $\alpha$  (MOENS; HANSS, 2011) (Figura 4). Consiste em realizar múltiplas análises para identificar o intervalo de resposta específico em cada nível de corte- $\alpha$ das funções de pertinência (DEY; MUKHOPADHYAY; ADHIKARI, 2018). O objetivo é encontrar combinações específicas das variáveis de entrada que resultem nas saídas extremas do problema. Isso requer buscas em diferentes direções de otimização (minimização e maximização) para cada corte- $\alpha$ , considerando-se as variáveis discretizadas. Assim, trata-se de uma otimização multiobjetivo, em que uma otimização deve ser realizada para cada corte- $\alpha$ .

#### **3.3. ALGORITMOS GENÉTICOS**

Para analisar a propagação das incertezas em sistemas com parâmetros representados por números *fuzzy*, será utilizado o algoritmo genético de seleção não dominada-II (NSGA-II) (DEB et al., 2002), uma técnica eficaz para resolver problemas de otimização multiobjetivo (WANG; SOBEY, 2020). A seguir é apresentada uma descrição detalhada de como o NSGA-II é aplicado nesta análise e como ele pode ser integrado ao método de decomposição de cortes- $\alpha$ .

Algoritmos genéticos (AG) são inspirados na seleção natural (GOLDBERG, 1989) e utilizam uma população de soluções candidatas para explorar o espaço de soluções de um problema. O NSGA-II, particularmente, é amplamente utilizado para problemas multiobjetivos devido ao seu princípio de Ótimo de Pareto, que prioriza soluções que dominam outras (PALAKONDA; GHORBANPOUR;



Figura 4. Decomposição de cortes.

MALLIPEDDI, 2018). O processo envolve a formação de uma população inicial, a avaliação das soluções e a aplicação de operadores genéticos como seleção, cruzamento e mutação para gerar novas soluções.

A técnica começa com a formação aleatória de uma população inicial de soluções e a avaliação da aptidão de cada uma, baseada nos objetivos do problema. A seleção é feita com base na ordem de não dominação, e a diversidade genética é mantida usando a métrica de distância da multidão, que assegura uma distribuição variada de soluções.

No contexto da análise de incertezas para materiais compósitos, cada cromossomo codifica a variação das variáveis de entrada. Cada cromossomo possui genes que representam variáveis específicas, como o ângulo e a espessura das camadas de um compósito laminado. A codificação é projetada para refletir as incertezas das variáveis, com cada gene codificando a variação em três valores: limite inferior, valor nominal e limite superior. Um exemplo de como os cromossomos são decodificados é apresentado na Figura 5.

O programa de análise mecânico (CMA) empregado utiliza unidades de engenharia para avaliar a aptidão de determinada solução. Dessa forma, os códigos genéticos dos cromossomos de cada lâmina devem sofrer uma transformação para unidades de engenharia. Finalmente, como cada corte- $\alpha$ possui intervalos de variabilidade diferentes, isso implica que haverá dicionários diferentes para cada otimização de cada corte- $\alpha$ .

O operador de recombinação tem o importante papel de criar organismos com base em um par de pais no processo de



Figura 5. Processo de decodificação dos cromossomos de uma estrutura qualquer.

reprodução. O operador genético de recombinação uniforme foi utilizado para criar indivíduos de pares de pais, permitindo a mistura diversificada de características e evitando a convergência prematura (MITCHELL, 1996).

A mutação é uma classe de operador genético responsável por manter a diversidade genética da população por meio da introdução de informações que não existiam nos cromossomos de pais. Neste trabalho foi utilizado um operador genético de mutação polinomial (DEB; SINDHYA; OKABE, 2007). Nesse operador, um gene no cromossomo é selecionado aleatoriamente e sofre uma perturbação baseada em uma distribuição polinomial. Esse operador é eficaz para explorar regiões do espaço de busca que não foram previamente exploradas.

Para cada nível de corte- $\alpha$ , o NSGA-II encontra uma solução otimizada que representa o intervalo de saída em termos de variabilidade. Os resultados são então combinados para formar uma visão abrangente das saídas possíveis do modelo *fuzzy*.

## 3.4. ANÁLISE MECÂNICA DAS SOLUÇÕES

A aptidão de uma solução em um algoritmo genético é avaliada com base nas funções objetivos do problema. Essas funções são aprimoradas por intermédio de análises mecânicas detalhadas da estrutura, em que métodos numéricos desempenham um papel crucial. A determinação do comportamento mecânico de materiais compósitos, mesmo em configurações simples, pode ser desafiadora, e métodos analíticos muitas vezes não oferecem a precisão necessária. Por isso, métodos numéricos, como o método dos elementos finitos (FEM), são utilizados para obter resultados mais precisos.

Neste estudo, a análise estrutural foi realizada utilizando a teoria de placas laminadas de deformação por cisalhamento de primeira ordem (FSDT) (REDDY, 2003) combinada com o FEM. A FSDT relaxa as suposições tradicionais de Kirchhoff ao considerar uma deformação por cisalhamento constante ao longo da espessura da camada, o que é adequado para modelar placas e cascas moderadamente espessas. Esta teoria também assume ligação perfeita entre camadas e uma espessura uniforme para cada camada. O campo de deslocamentos em um laminado é descrito pela Equação 2:

$$u(x, y, z) = u_0(x, y, z) + z \frac{\partial w_0}{\partial x},$$
  

$$v(x, y, z) = v_0(x, y, z) + z \frac{\partial w_0}{\partial y},$$
  

$$w(x, y, z) = w_0(x, y)$$
(2)

Em que:

(u, v, w): as componentes do vetor de deslocamento;
 (u<sub>0</sub>, v<sub>0</sub>, w<sub>0</sub>): os deslocamentos na superfície média do laminado.

Assumindo pequenas deformações e rotações moderadas, as deformações são dadas pela Equação 3:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w_0}{\partial x} \right)^2 + z \frac{\partial \theta_x}{\partial x},$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w_0}{\partial y} \right)^2 + z \frac{\partial \theta_y}{\partial y},$$

$$\gamma_{xy} = \left( \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial w_0}{\partial y} \right) + z \left( \frac{\partial \theta_x}{\partial y} + \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \right),$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial w_0}{\partial x} + \theta_x,$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial w_0}{\partial y} + \theta_y$$
(3)

Para a implementação da FSDT, utilizou-se um elemento quadrilátero com quatro nós, cada um com 5 graus de liberdade (DOF), totalizando 20 DOF por elemento. Esses DOF incluem dois deslocamentos no plano e três de flexão. A teoria das placas de Mindlin, acompanhada de funções de interpolação de Lagrange, foi empregada para aproximar o campo de deslocamento e garantir a precisão da análise.

Esta abordagem permite uma análise detalhada e precisa das estruturas, vital para a avaliação da aptidão das soluções geradas pelos algoritmos genéticos.

## 3.5. MÉTODO PARA A ANÁLISE DE INCERTEZAS

O método proposto, que combina as três técnicas supracitadas para melhorar a previsão do comportamento mecânico de compósitos laminados, é apresentado na Figura 6. Conforme pode ser visto nessa figura, os passos para implementar o método proposto são:

- Fuzzificação: representação de parâmetros como números fuzzy;
- Análise de intervalos: aplicação do método de decomposição de cortes-α;
- NSGA-II: otimização com o NSGA-II;
- Saída fuzzy: interpretação dos resultados.



Figura 6. Diagrama da metodologia proposta.

#### **3.6. CUSTO COMPUTACIONAL**

Com o objetivo de propiciar uma análise do custo computacional da otimização realizada pela NSGA-II em conjunto com o MEF, uma placa quadrada, formada por oito lâminas simétricas de material compósito, engastada em dois lados apostos e submetida a uma carga transversal uniformemente distribuída, foi otimizada, tendo dois objetivos conflitantes: minimizar o peso da placa e minimizar o deslocamento vertical máximo. Nesse problema, o espaço de pesquisa foi formado pelos diferentes ângulos das fibras e espessuras que cada lâmina poderia assumir: (0°, 45°, -45°, 90°) e (0,75 mm, 1,00 mm, 1,50 mm, 2,00 mm). Para a otimização utilizando AG, cada sequência de laminação foi definida por dois pares de cromossomos formados por quatro genes cada: um para os ângulos de orientação das fibras e o outro para as espessuras das lâminas. O problema exibe, portanto, 65.536 (44 x 44) combinações possíveis para o laminado e 251 estruturas formam o Ótimo de Pareto. No caso específico dos AG voltados para a otimização de materiais laminados, torna-se necessária a realização da análise estrutural (MEF) de cada indivíduo a fim de determinar sua aptidão. Nesse sentido, o custo computacional representa a quantidade média de análises exigidas para que a otimização encontre todas as 251 soluções do Ótimo de Pareto.

#### **3.7. ESTUDO DE CASO**

Para realizar a análise e comparações do método proposto, uma placa composta de grafite-epóxi de oito camadas (fixada nas bordas superior e inferior), submetida a uma carga uniformemente distribuída na sua face superior, foi objeto de estudo. Uma representação esquemática do problema é apresentada na Figura 7.

Neste estudo foi analisado o efeito das incertezas no deslocamento central da placa para todas as 15 estruturas que formam o conjunto Ótimo de Pareto do estudo realizado por Almeida e Awruch (2009) (Figura 8).

O algoritmo NSGA-II foi aplicado separadamente a cada um dos pontos mencionados. Em todas as execuções de otimização o tamanho da população foi definido como 150, e foi adotado o parâmetro do esquema elitista Ne = 5.

 $P = 10^{5} Pa$ 

Figura 7. Dimensões e condições de contorno da placa objeto do estudo.

O operador genético de recombinação foi estabelecido para a probabilidade de 1 e a razão de mutação 0,06. O parâmetro utilizado como critério de convergência foi o número máximo de gerações, definido em 150.

O estudo de caso considerou como variáveis de imprecisão o ângulo de orientação das fibras, a espessura das camadas e módulo de elasticidade longitudinal em cada camada laminada, bem como o caso combinado em que todos os parâmetros de entrada apresentam incertezas. Postula-se que a distribuição de parâmetros de entrada analisados se encaixa em uma zona de tolerância específica. As funções de pertinência são apresentadas na Figura 9.



Figura 8. Estruturas formando o Ótimo de Pareto.



Figura 9. Funções de pertinência para (a) o ângulo de orientação das fibras, (b) espessura das lâminas e módulo de elasticidade longitudinal.

## **4. RESULTADOS**

#### **4.1. CUSTO COMPUTACIONAL**

Conforme mencionado previamente, os AG são fundamentados em regras randômicas, de modo que os resultados variam a cada execução do algoritmo. Assim, foram realizadas 30 simulações, todas utilizando os parâmetros de otimização que estão detalhados na Tabela 1.

Verifica-se, por meio da Figura 10, o poder de busca do NSGA-II acoplado ao MEF para identificar os 251 pontos mais eficientes em uma população total de 65.536 indivíduos (representando 0,38% do total); o AG analisou, em média, 2.164 estruturas, o que corresponde a aproximadamente 3,3% da população total.

#### **4.2. DESLOCAMENTO CENTRAL**

As respostas das estruturas analisadas são mostradas na Figura 11. Para cada figura é possível observar como a estrutura se comporta diante das incertezas.

## Tabela 1. Parâmetros de otimização do algorismo genético.

Parâmetro	Valor
População inicial	256
População de descendentes	10
Tipo de <i>crossover</i>	Uniforme
Probabilidade de <i>crossover</i>	100%
Probabilidade de mutação	3%
Número máximo de gerações	200



Figura 10. Custo computacional.

Verifica-se que, quando há certo grau de incerteza nos parâmetros de entrada, placas mais finas são mais suscetíveis a maiores deformações. Esse comportamento é observado de forma consistente para todas as três variáveis em análise, bem como para o seu efeito combinado. No entanto, os impactos específicos diferem em cada caso.

No primeiro e no segundo caso (a e b), as incertezas tendem a aumentar da deflexão da placa, com maior influência da espessura. Para incertezas no módulo de elasticidade longitudinal (c), as respostas apresentam valores simétricos em relação aos valores nominais, sem mostrar nenhuma tendência definida. Por fim, a resposta de saída das incertezas combinadas (d) mostrou tendência pronunciada para aumentar o deslocamento central da placa.

#### 4.3. NÚMEROS FUZZY DE SAÍDA

Para visualizar a distribuição dos números *fuzzy* de entrada (representados por funções de pertinência triangular) e sua influência nas respostas da estrutura, foi selecionado o ponto O para análise.

Conforme observado na Figura 12, as faixas ou larguras máximas dos deslocamentos centrais das placas de materiais compósitos são mais evidentes quando se consideram variações combinadas do ângulo de orientação das camadas, a espessura das lâminas e módulo de elasticidade, exceto para o corte- $\alpha$  = 1, que representa os respectivos valores determinísticos dos deslocamentos centrais. Para qualquer nível de corte- $\alpha$ , a espessura das lâminas é o parâmetro que mais influencia o deslocamento central.

O segundo parâmetro com maior influência varia conforme o nível de corte- $\alpha$ : para grandes incertezas ( $\alpha = 0$  e  $\alpha = 0,25$ ), o ângulo de orientação das fibras tem a segunda maior influência, enquanto para outros níveis de corte- $\alpha$  o módulo de elasticidade longitudinal é o segundo parâmetro mais influente no deslocamento central. Incertezas nos ângulos de orientação das fibras tendem a aumentar a deflexão da placa. Em contraste, as incertezas relacionadas à espessura das lâminas e ao módulo de elasticidade longitudinal apresentam efeitos simétricos em relação ao valor nominal do deslocamento central. Além disso, ao analisar as respostas relacionadas à imprecisão no ângulo de orientação, observa-se uma linha vertical no lado esquerdo do gráfico de números *fuzzy*, indicando que a configuração nominal (determinística) resulta no menor deslocamento central possível. Qualquer variação nos



Figura 11. Propagação das incertezas no deslocamento central das estruturas indicadas na Figura 8, apontando os extremos de respostas e os valores determinísticos para as incertezas em (a) ângulo de orientação das fibras, (b) espessura das lâminas, (c) módulo de elasticidade longitudinal e (d) caso combinado.



Figura 12. Números fuzzy de saída do ponto O.

parâmetros tende a aumentar a deflexão da placa, demonstrando a sensibilidade da estrutura a mudanças nos parâmetros de entrada.

## **5. CONCLUSÕES**

Este estudo foi motivado pelas limitações dos processos tradicionais de avaliação do desempenho mecânico dos materiais compósitos quando confrontados com incertezas nos parâmetros de engenharia. O método proposto aborda essas limitações por meio da propagação das incertezas em placas de material compósito laminado. Para isso, foi desenvolvida uma metodologia de análise abrangente que combina os princípios da teoria dos conjuntos *fuzzy*, o algoritmo NSGA-II e uma ferramenta de análise mecânica de compósitos (CMA), baseada no método dos elementos finitos.

Por meio de três análises distintas, foi possível identificar como cada incerteza influencia o comportamento da placa, fornecendo tanto informações qualitativas quanto quantitativas. Além disso, as fronteiras de resposta forneceram uma noção relativa de sensibilidade às incertezas em diferentes resultados apresentados neste artigo. Embora as conclusões numéricas sejam específicas para o problema abordado, os conceitos desenvolvidos podem ser expandidos para sistemas mais complexos com um número significativo de variáveis *fuzzy*, oferecendo informações valiosas para o projeto de materiais estruturais. Por fim, o trabalho não apenas oferece um novo horizonte de possibilidades para a compreensão das incertezas em materiais compósitos, mas também serve como um exemplo de como a combinação adequada de métodos avançados pode levar a resultados valiosos, promovendo avanços tanto na confiabilidade das estruturas quanto na tomada de decisões.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F.; AWRUCH, A. Design optimization of composite laminated structures using genetic algorithms and finite element analysis. *Composite Structures*, v. 88, n. 3, p. 443-454, 2009. https:// doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.05.004

AWRUCH, M. D. de F. Análise de incertezas no controle de vibração em sistemas de materiais compósitos com atuação piezelétrica. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

BARBERO, J. Introduction to composite materials design. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.

CHAWLA, K. K. Composite materials. 3. ed. Nova York: Springer, 2013.

DEB, K.; PRATAP, A.; AGARWAL, S.; MEYARIVAN, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 6, 2002.

DEB, K.; SINDHYA, K.; OKABE, T. Self-adaptive simulated binary crossover for real-parameter optimization. *In*: ANNUAL CONFERENCE ON GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION, 9., 2007. *Proceedings* [...]. Nova York: ACM, 2007.

DEY, S.; MUKHOPADHYAY, T.; ADHIKARI, S. Uncertainty quantification in laminated composites. Nova York, NY: Productivity Press, 2018.

GOLDBERG, D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Nova York: Addison-Wesley, 1989.

MITCHELL, M. *An introduction to genetic algorithms*. Londres: MIT Press, 1996. (Complex adaptive systems.)

MOENS, D.; HANSS, M. Non-probabilistic finite element analysis for parametric uncertainty treatment in applied mechanics: Recent advances. *Finite Elements in Analysis and Design*, v. 47, n. 1, p. 4-16, 2011. https://doi.org/10.1016/j.finel.2010.07.010

MÖLLER, B.; BEER, M. Fuzzy randomness. Berlim: Springer, 2004.

PALAKONDA, V.; GHORBANPOUR, S.; MALLIPEDDI, R. Pareto dominance-based moea with multiple ranking methods for many-objective optimization. *In:* IEEE SYMPOSIUM SERIES ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE, 2018. *Anais* [...]. 2018. p. 958-964.

REDDY, J. N. *Mechanics of laminated composite plates and shells:* theory and analysis. [S.l.]: CRC Press, 2003.

SCARTH, C.; ADHIKARI, S. Modeling spatially varying uncertainty in composite structures using lamination parameters. *AIAA Journal*, v. 55, n. 11, p. 3951-3965, 2017. https://doi.org/10.2514/1.J055705

WANG, Z.; SOBEY, A. A comparative review between genetic algorithm use in composite optimisation and the state-of-the-art in evolutionary computation. *Composite Structures*, v. 233, p. 111739, 2020. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111739

ZADEH, L. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information Sciences*, v. 8, n. 3, p. 199-249, 1975. https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90036-5

ZHANG, H. *Nondeterministic linear static finite element analysis: an interval approach*. Tese (Doutorado) – Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2005.

## EMPREGO DE REDE NEURAL CONVOLUCIONAL NO RECONHECIMENTO DE CLASSES DE NAVIOS COM O USO DE SILHUETAS DE IMAGENS INFRAVERMELHAS

Use of convolutional neural network in the recognition of ship classes from infrared image silhouettes

Jorge Amaral Alves<sup>1</sup>, Edgard Braz Alves<sup>2</sup>

**Resumo:** Neste trabalho foi apresentada uma nova arquitetura para um Sistema Classificador Automático de Classes de Navios empregando uma Rede Neural Convolucional (CNN) aplicada a imagens infravermelhas de modelos tridimensionais (3-D) de navios. A arquitetura de CNN selecionada foi uma *fine-tuned* Squeezenet. Os resultados obtidos superam os disponíveis na literatura, oferecendo uma solução no estado da arte com base na acurácia obtida para o *dataset* simulado de entrada. A eficácia obtida neste trabalho sugere seu futuro emprego em sistemas *Forward Looking InfraRed* (FLIR) de aeronaves para a identificação de contatos em operações navais noturnas.

Palavras-chave: Rede Neural Convolucional. Silhuetas de navios. Reconhecimento automático de alvos. Processamento de imagens infravermelhas.

**Abstract:** In this paper, a new architecture for an Automatic Ship Classification System using a Convolutional Neural Network (CNN) applied to infrared images of 3-D models of ships was presented. The CNN architecture selected was a fine-tuned Squeezenet. The results obtained exceed those available in the literature, offering a state-of-the-art solution based on the accuracy obtained with the simulated input dataset. The effectiveness obtained in this paper suggests its future use in aircraft Forward Looking InfraRed (FLIR) systems for target identification in naval operations at night.

**Keywords:** Convolutional neural network. Ships silhouettes. Automatic target recognition. Infrared image processing.

2. Capitão-Tenente. Mestre em Ciência da Computação, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: braz.edgard@ime.eb.br

<sup>1.</sup> Capitão de Mar e Guerra. Mestre em Ciência da Computação pela Naval Postgraduate School (Califórnia, Estados Unidos). Coordenador de Eletrônica do Centro Técnico-Científico, Escola Naval, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: jorge.amaral@marinha.mil.br

## **1. INTRODUÇÃO**

Os sistemas de visão noturna baseados em câmeras infravermelhas (*Forward Looking Infrared* — FLIR) têm sido largamente utilizados em combates militares e recebido grandes avanços tecnológicos. Como exemplo, podemos citar o desenvolvimento do FLIR ar-terra empregado na Guerra do Vietnã (1955 a 1975), na denominada Batalha Profunda. Esses equipamentos permitiram a detecção de alvos terrestres em completa escuridão, impedindo a chegada de reforços para as forças inimigas (CLANCY; HORNER, 2008).

No ambiente de guerra naval, um dos principais meios empregados na identificação de alvos a longas distâncias tem sido o emprego de aeronaves de reconhecimento. Essas aeronaves podem ser empregadas em ambientes noturnos e em condições meteorológicas adversas (CLARINO, 2006).

Uma maneira de maximizar a distância de identificação de um alvo por uma aeronave, sem comprometer a segurança desta própria aeronave, consiste no emprego de um sistema FLIR dotado de algoritmo de identificação automática de alvos (*Automatic Infrared Target Recognition* — ATR<sub>IR</sub>). Esses ATR<sub>IR</sub> permitem maximizar a distância de identificação de um alvo sem comprometer a taxa de acertos nem a segurança da própria aeronave.

Várias abordagens que envolvem o processo de classificação automática de navios usando imagens infravermelhas ou coloridas podem ser encontradas na literatura. Nessas abordagens, podem ser identificados ATR<sub>IR</sub> desenvolvidos para fins específicos, tais como: vigilância de portos; segurança antipirataria; sistemas de guiagem (*seekers*) infravermelhos de mísseis antinavio; e identificação de navios por FLIR aeroembarcados.

Neste trabalho, apresenta-se uma nova arquitetura de  $ATR_{IR}$  que emprega o *dataset* disponibilizado por Alves e Alves (2023) e uma rede neural convolucional (*convolutional neural network* — CNN) denominada Squeezenet. Essa CNN foi escolhida em função da sua elevada eficiência e baixa profundidade de rede quando comparada com a conhecida CNN AlexNet (IANDOLA et al., 2016).

A CNN Squeezenet otimizada neste trabalho atingiu 99,8% de acurácia com o *dataset* de imagens simuladas. Tal resultado representa a acurácia média obtida após 30 experimentos da CNN com seus hiperparâmetros ajustados de acordo com os processos de treinamento, validação e teste, considerando-se um *cross validation* de 70-15-15%, respectivamente. A acurácia obtida neste trabalho demonstra a melhor capacidade de generalização desta nova arquitetura de  $ATR_{IR}$  quando comparada com a de Alves e Alves (2023).

Este trabalho está dividido em introdução e outras quatro seções. A Seção 2 disserta acerca dos principais trabalhos relacionados ao tema central, qual seja, o desenvolvimento de um  $ATR_{IR}$ . A metodologia proposta por este artigo é descrita na Seção 3. Na seção 4 são apresentados os resultados obtidos empregando o  $ATR_{IR}$  proposto, tendo como entrada um *dataset* de imagens simuladas e um *dataset* de imagens reais. A quinta e última seção destaca as principais contribuições deste trabalho, bem como sugere possíveis pesquisas futuras a fim de dar continuidade à pesquisa científica proposta.

### 2. TRABALHOS RELACIONADOS

Dentre os principais trabalhos que apresentam bons resultados para a classificação automática de navios empregando imagens infravermelhas e coloridas, podemos citar: Alves, Herman e Rowe (2004); Li e Wang (2008); Kumlu (2012); Kechagias-Stamatis, Aouf e Nam (2017); Westlake (2021); e Alves e Alves (2023). Esses trabalhos realçam a importância do desenvolvimento de algoritmos de classificação automática que empregam imagens infravermelhas e coloridas de navios.

Em Alves, Herman e Rowe (2004), foi desenvolvido um ATR<sub>IR</sub> baseado em rede neural tradicional, com uma única camada escondida, para imagens infravermelhas, com aplicação em FLIR aeroembarcado, considerando cinco classes de navios. As classes de navios foram representadas por modelos tridimensionais (3-D) *wireframe* criados em MATLAB para compor o *dataset* utilizado. Esse *dataset* foi composto de 46 ângulos de elevação e 180 ângulos de azimute.

Em Li e Wang (2008), foi apresentada uma nova abordagem considerando o conjunto de imagens de Alves, Herman e Rowe (2004), porém substituindo o classificador por uma máquina de vetores de suporte (*support vector machine* — SVM) e considerando apenas duas das cinco classes de navios.

Em Kumlu (2012), foi desenvolvido um  $ATR_{IR}$  baseado em SVM empregando imagens coloridas de domínio público e imagens 2-D simuladas, criadas com base em modelos 3-D gerados pelo aplicativo *Google Sketch Up*.

Em Kechagias-Stamatis, Aouf e Nam (2017), foi desenvolvido um  $ATR_{IR}$  baseado em rede neural multimodal

empregando imagens infravermelhas simuladas, criadas com base em modelos 3-D gerados com um programa de *computer-aided design* (CAD) para a aplicação em *seeker* infravermelho de mísseis antinavio.

Em Westlake (2021), foi desenvolvido um ATR<sub>IR</sub> baseado em uma CNN YOLOv3 e que empregava o mesmo *dataset* utilizado por Kechagias-Stamatis, Aouf e Nam (2017). Esse ATR<sub>IR</sub> também foi desenvolvido para emprego em *seeker* infravermelho de mísseis antinavio.

Recentemente, em Alves e Alves (2023), foi apresentado um  $ATR_{IR}$  baseado em uma rede neural multicamadas (*multilayer perceptron* — MLP) que empregava o mesmo conjunto de imagens utilizado por Alves, Herman e Rowe (2004) para emprego em aeronave em operação de reconhecimento noturno, ou seja, empregando as cinco classes de navios como *dataset* de entrada, bem como os 46 ângulos de elevação, tendo obtido 93,6% de acurácia.

A Tabela 1 apresenta algumas características dos *datasets* dos trabalhos relacionados, citados neste trabalho, bem como destaca os respectivos tipos de classificadores utilizados.

Observando-se a Tabela 1, nota-se que o classificador empregado por Li e Wang (2008) foi baseado em uma SVM, porém empregou apenas duas das cinco classes de navios disponíveis usadas por Alves, Herman e Rowe (2004) e também por Alves e Alves (2023). Os demais trabalhos têm aplicações em câmeras de segurança de portos e em *seeker* infravermelho de míssil antinavio, e, portanto, seus respectivos *datasets* possuem ângulos de elevação baixos, próximos à linha do horizonte, não sendo adequados para aplicações em  $ATR_{IR}$  de emprego geral, ou seja, para um sistema FLIR aeroembarcado destinado a operações de reconhecimento noturnas, que precisa ser treinado e testado em ângulos de elevação elevados.

Adicionalmente, ressalta-se que o classificador empregado em Alves e Alves (2023) obteve 93,6% de acurácia e foi empregado como *baseline* para este trabalho.

## **3. METODOLOGIA PROPOSTA**

A metodologia proposta neste trabalho pode ser visualizada pela Figura 1.

Com base na Figura 1, nota-se que, inicialmente, foram gerados os modelos 3-D de cinco classes de navios empregando o MATLAB (2023). Posteriormente, foram obtidas as projeções ortogonais desses modelos para diferentes ângulos de elevação e de azimute a fim de criar o *dataset* com 41.400 silhuetas simuladas de navios.

O *dataset* disponibilizado por Alves e Alves (2023) foi empregado para treinar, validar e testar a CNN Squeezenet com imagens simuladas. Posteriormente, empregou-se essa CNN Squeezenet treinada para teste com imagens infravermelhas reais.

		Classificador			
	Número de imagens	Total de Classes de navios	Total de ângulos de elevação	Total de ângulos de azimute	Tipo de classificador
Alves, Herman e Rowe (2004) <sup>1</sup>	41.400	5	46	180	Rede Neural Perceptron
Li e Wang (2008) <sup>1</sup>	16.560	2	46	180	SVM
Kumlu (2012) <sup>2</sup>	3.888	9	2 (0º e 5º)	18	SVM
Kechagias-Stamatis, Aouf e Nam (2017)³	11.520	4	3 (0º;-10º; -20º)	360	Rede Neural Multimodal
Westlake (2021) <sup>3</sup>	11.520	4	3 (0º;-10º; -20º)	360	CNN YOLOv3
Alves e Alves (2023) <sup>1</sup>	41.400	5	46	180	MLP

#### Tabela 1. Características dos datasets e dos classificadores dos trabalhos relacionados.

<sup>1</sup>ATR<sub>IR</sub> com emprego em FLIR aeroembarcado; <sup>2</sup>ATR<sub>IR</sub> com emprego em câmeras de segurança de portos; <sup>3</sup>ATR<sub>IR</sub> com emprego em *seeker* infravermelho de míssil antinavio.



Figura 1. Diagrama com as etapas do Automatic Infrared Target Recognition (ATR<sub>10</sub>) proposto.

#### 3.1. DATASET DE IMAGENS SIMULADAS

O *dataset* de imagens simuladas foi constituído por silhuetas de navios obtidas de projeções ortogonais de modelos 3-D criados em MATLAB (2023).

Foram empregados modelos 3-D de cinco classes de navios, que foram disponibilizados por Alves e Alves (2023) para utilização neste trabalho. Tais modelos foram criados em MATLAB buscando representar um objeto pela conexão de faces, ou polígonos, gerando, assim, modelos tridimensionais do tipo wireframe. Conforme detalhado em Alves e Alves (2023), as classes de navios modeladas foram: navio aeródromo baseado na imagem, escala 1:1.800, do navio aeródromo Carl Vinson (Classe Nimitz), obtida no Jane's Fighting Ships (SHARPE, 2000); imagem do contratorpedeiro Oscar Austin (Classe Arleigh Burke), escala 1:1.500, obtida no Jane's Fighting Ships (SHARPE, 2000); imagem da fragata Rentz Hgate (Classe Oliver Hazard Perry), escala 1:1.200, obtida no Jane's Fighting Ships (SHARPE, 2000); especificações do Manual do Navio de Pesquisa R/V Pelican (ALVES; HERMAN; ROWE, 2004); e navio mercante baseado nas especificações gerais do petroleiro norte americano Sea Isle City (ALVES; HERMAN; ROWE, 2004). Ressalta-se que, dessas cinco classes modeladas, três são de navios de guerra (navio aeródromo, fragata e contratorpedeiro) de diferentes dimensões; e duas classes são de navios civis (navio mercante e navio de pesquisa) também de diferentes dimensões.

Dessa forma, foram geradas 41.400 imagens binárias que foram usadas como *dataset* de imagens simuladas para os processos de treino, validação e teste. Para a definição do quantitativo de imagens para treino, validação e teste foi adotado o método de *cross validation* 70-15-15%, respectivamente.

#### 3.2. DATASET DE IMAGENS INFRAVERMELHAS REAIS

Imagens infravermelhas de navios militares são difíceis de serem obtidas em função da natureza reservada dessas imagens. Neste trabalho, foram empregadas as imagens infravermelhas reais disponibilizadas por Alves, Herman e Rowe (2004).

O *dataset* de imagens reais consiste em 14 imagens infravermelhas coletadas pelo FLIR AN/AAS-44V aeroembarcado. Essas 14 imagens são compostas de: sete imagens infravermelhas de navios mercantes; duas imagens infravermelhas de contratorpedeiros; três imagens infravermelhas de navios aeródromos; e duas imagens infravermelhas de navios de pesquisa. Exemplos de imagens infravermelhas desse *dataset* podem ser observados na Figura 2.

#### 3.3. PRÉ-PROCESSAMENTO DO DATASET DE IMAGENS REAIS

O *dataset* de imagens infravermelhas reais precisou passar por duas etapas de pré-processamento a fim de se obter uma imagem binária que destacasse apenas o navio e o fundo.

Na primeira etapa, empregando-se o aplicativo do MATLAB (2023) denominado Color Thresholder, a imagem real com 256 níveis de cinza (Figura 3a) foi convertida em uma imagem binária por meio de um filtro de segmentação por limiar. O resultado é indicado na Figura 3b.

Na segunda etapa, empregando-se o aplicativo do MATLAB (2023) denominado Image Segmenter, a imagem binária pré-processada pela primeira etapa foi submetida a outros métodos, tais como: clusterização automática; limpeza de ruídos próximos à borda, denominados *clearing boarders*; preenchimento de buracos correspondentes a cada *cluster* identificado, denominados *fill holes*; e outras etapas envolvendo erosões e dilatações. Com a aplicação desses métodos sucessivos, foi possível obter uma imagem em que o objeto se destaca do fundo. Dessa forma, atingiu-se a imagem adequada para ser aplicada no classificador baseado na CNN Squeezenet otimizada.

A imagem binária final resultante das duas etapas de pré--processamento da imagem do contratorpedeiro da Classe Arleigh Burke pode ser observada na Figura 3c.

# 3.4. CLASSIFICADOR BASEADO NA REDE NEURAL CONVOLUCIONAL SQUEEZENET

A CNN é uma rede neural artificial que possui estrutura específica destinada a extrair as características de uma imagem, ou seja, a CNN recebe em sua camada inicial a própria imagem bidimensional. A CNN possui camadas convolucionais, destinadas a extrair as diversas características da imagem, bem como possui camadas de *pooling*, destinadas a reduzir a carga computacional.



**Figura 2.** Exemplos do *dataset* de imagens infravermelhas reais: (A) imagens dos navios; (B) imagens infravermelhas reais obtidas pelo FLIR AN/AAS-44V aeroembarcado.



Figura 3. Pré-processamento da imagem infravermelha: (A) imagem original; (B) imagem após a 1ª etapa; (C) imagem final após a 1ª e 2ª etapas.

O classificador empregado neste trabalho foi baseado na técnica de *fine tuning* de uma CNN pré-treinada, a fim de adaptá-la para a aplicação específica desta pesquisa. Para essa finalidade foi escolhida a Squeezenet. A opção por esta CNN deveu-se ao fato de ela apresentar bom desempenho, comparável ao da AlexNet, na classificação de imagens, porém com 50 vezes menos parâmetros e tamanho 510 vezes menor. Tal característica permite que a Squeezenet seja usada em dispositivos com pouca memória (IANDOLA et al., 2016).

Adicionalmente, a Squeezenet é uma rede de tamanho médio quando comparada com as demais. Em termos topológicos, a arquitetura da rede Squeezenet é distinta das arquiteturas de outras CNN por empregar os *fire modules* que são compostos de camadas *squeeze*, que contêm filtros de convolução 1x1, e por camadas *expand*, que contêm filtros de convolução 1x1 e 3x3, conforme detalhado em Iandola et al. (2016). Tal arquitetura pode ser visualizada na Figura 4.

Neste trabalho, a entrada da Squeezenet foi composta por imagens binárias de tamanho 220x280 pixels.

## **4. RESULTADOS OBTIDOS**

#### 4.1. RESULTADOS OBTIDOS COM O DATASET DE SILHUETAS SIMULADAS

A Squeezenet foi treinada empregando-se as silhuetas obtidas dos cinco modelos 3-D criados em MATLAB (2023) e disponibilizados por Alves e Alves (2023) para este trabalho. Este *dataset* foi dividido em 70% para treinamento, 15% para validação e 15% para teste. Os processos de treinamento, validação e teste foram repetidos 30 vezes a fim de verificar a consistência dos resultados. Em cada rodada, foram empregados diferentes conjuntos, obtidos de forma aleatória, mantendo-se a proporção 70-15-15%. Os resultados de cada rodada se mostraram consistentes, como pode ser observado na Figura 5.

Na Figura 5, percebe-se que a acurácia do processo de treinamento variou entre 99,2 e 100% e a do processo de validação variou entre 99,89 e 99,95%. Esses resultados demonstram a estabilidade da arquitetura do  $ATR_{IR}$  proposto neste trabalho.

O desempenho do  $\mathrm{ATR}_{\mathrm{IR}}$  proposto neste trabalho pode ser observado na Tabela 2.

A Tabela 2 apresenta a matriz de confusão obtida ao testar a Squeezenet otimizada com o *dataset* de teste de imagens simuladas (6.210 silhuetas). É possível observar nessa tabela o valor de acurácia total, bem como as taxas de verdadeiros positivos (*true positive rate* — TPR) e os valores previstos positivos (PPV). Observando-se a figura, percebe-se que a acurácia total obtida no processo de teste com imagens simuladas foi de 99,8%. Ao compararmos esse resultado com o obtido por Alves e Alves (2023), podemos concluir que o ATR<sub>IR</sub> proposto neste trabalho tornou possível melhorar a precisão e a cobertura em todas as cinco classes de navios modeladas. Tais resultados demonstram o excelente desempenho do ATR<sub>IR</sub> proposto considerando-se



Figura 4. Rede neural convolucional Squeezenet: (A) fire modules; (B) arquitetura da rede Squeezenet.



Figura 5. Resultados das 30 rodadas de classificação: (A) acurácia do processo de treinamento; (B) acurácia do processo de validação.

Classes de Navios de Entrada		TPR				
	NAe	СТ	F	М	R/V	(%)
Navio Aeródromo (NAe)	1.242					100
Contratorpedeiro (CT)		1.238	4			99,6
Fragata (F)		5	1.236	1		99,5
Mercante (M)	1		2	1.239		99,8
Navio de Pesquisa (R/V)					1.242	100
PPV (%)	99,9	99,6	99,5	99,9	100	99,8

Tabela 2. Matriz de confusão da fase de teste com as imagens simuladas.

o *dataset* de imagens infravermelhas simuladas criadas com base nos modelos 3-D propostos. Além disso, com o presente trabalho foi possível melhorar a precisão geral obtida por Alves e Alves (2023) de 93,6 para 99,8% empregando uma CNN Squeezenet otimizada.

## 4.2. RESULTADOS OBTIDOS COM IMAGENS REAIS

O ATR<sub>IR</sub> proposto neste trabalho também foi testado empregando-se o *dataset* de imagens infravermelhas reais disponibilizado por Alves, Herman e Rowe (2004).

A Tabela 3 apresenta a matriz de confusão obtida com o *dataset* de imagens infravermelhas reais testadas com a CNN Squeezenet otimizada.

Na Tabela 3, observa-se que os melhores resultados obtidos foram: cobertura de 100% para as classes contratorpedeiro e navio de pesquisa; e precisão de 66,7% para a classe navio aeródromo. Adicionalmente, ressalta-se que o *dataset* utilizado possui um pequeno número de imagens reais, sendo necessário um *dataset* com maior número de imagens para melhor avaliar o comportamento do ATR<sub>IR</sub> proposto quando submetido a imagens reais.

Classes de Navios de Entrada		TPR				
	NAe	СТ	F	М	R/V	(%)
Navio Aeródromo (NAe)	2			1		66,7
Contratorpedeiro (CT)		1		1		50
Fragata (F)						-
Mercante (M)	1		2	4		57,1
Navio de Pesquisa (R/V)				1	1	50
PPV (%)	66,7	100	-	57,1	100	-

#### Tabela 3. Matriz de confusão da fase de teste com as imagens reais.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste artigo foi possível avaliar, por meio de várias rodadas de treinamento, validação e teste, a eficiência e a estabilidade de uma nova arquitetura de  $ATR_{IR}$  baseada em uma CNN Squeezenet otimizada empregando imagens infravermelhas simuladas.

O ATR<sub>IR</sub> proposto neste trabalho obteve precisão de 99,8% quando testado com imagens simuladas. Essa precisão

oferece, como contribuição à comunidade científica, a melhor arquitetura de  $ATR_{IR}$  para imagens infravermelhas simuladas até o momento, considerando-se a aplicação na identificação de navios por sistemas FLIR aeroembarcados e o *dataset* de imagens simuladas utilizado.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se citar o teste do  $ATR_{IR}$  proposto com número maior de imagens FLIR reais, bem como com maior número de classes de navios a serem modeladas.

## REFERÊNCIAS

ALVES, J. A.; ALVES, E. B. Emprego de rede neural multicamadas no reconhecimento automático de silhuetas infravermelhas de navios. *Revista Pesquisa Naval*, v. 1, n. 35, p. 56-63, 2023.

ALVES, J. A.; HERMAN, J.; ROWE, N. C. *Robust recognition of ship types from an infrared silhouette.* Technical report. Monterey: Naval Postgraduate School, 2004.

CLANCY, T.; HORNER, C.; *Every man a tiger (revised): The Gulf War air campaign.* Penguin, 2008. v. 2.

CLARINO, M. S. Uso operacional do FLIR nos esquadrões do terceiro grupo de aviação. 2006. Disponível em: https://abra-pc. com.br/publicacoes-abra-pc/premio-pacau/218-2006-1-lugar-uso-operacional-do-flir-nos-esquadroes-do-3-grupo-de-aviacao-do-1-ten-av-miguel-dos-santos-clarino. Acesso em: 22 jan. 2024.

IANDOLA, F. N.; HAN, S.; MOSKEWICZ, M. W.; ASHRAF, K.; DALLY, W. J.; KEUTZER, K. Squeezenet: Alexnet-level accuracy with 50x fewer parameters and <0.5MB model size. *arXiv preprint*, 2016.

KECHAGIAS-STAMATIS, O.; AOUF, N.; NAM, D. Multi-modal automatic target recognition for anti-ship missiles with imaging infrared capabilities. *In*: SENSOR SIGNAL PROCESSING FOR DEFENCE CONFERENCE, 2017. *Anais* [...]. 2017, p. 1-5. https://doi.org/10.1109/SSPD.2017.8233244

KUMLU, D. *Autonomous ship recognition from color images.* Tese (Doutorado) – University of Southern California, California, 2012.

LI, H.; WANG, X. Automatic recognition of ship types from infrared images using support vector machines. *In*: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE AND SOFTWARE ENGINEERING, 6., 2008. *Anais* [...]. 2008. p. 483-486. https://doi. org/10.1109/CSSE.2008.1647

SHARPE, R. Jane's fighting ships. Alexandria: Jane's Information Group, 2000.

WESTLAKE, S. T. *The application of deep learning algorithms to longwave infrared missile seekers.* Tese (Doutorado) – Cranfield University, Bedford, 2021.

# MÉTODO NUMÉRICO PARA A ESTIMATIVA DE RUÍDO HIDRODINÂMICO APLICADO A UM PROPULSOR DE SUBMARINO

Numerical method for the assessment of hydrodynamic noise applied to a submarine propeller

Bruno Pegoraro<sup>1</sup>, Hélio Corrêa da Silva Junior<sup>1</sup>, André Mitsuo Kogishi<sup>2</sup>, Ricardo Sbragio<sup>3</sup>, Alexandre Nicolaos Simos<sup>4</sup>

Resumo: A discrição acústica é crucial para a sobrevivência e eficácia operacional de submarinos. Entre os diversos tipos de ruído emitidos, o ruído hidrodinâmico relaciona-se diretamente à operação do propulsor, à forma do casco e aos seus apêndices. Este estudo propõe um método numérico para avaliar a emissão de ruído hidrodinâmico de um propulsor localizado na popa de um modelo de submarino de geometria simplificada. O método utiliza Computational Fluid Dynamics (CFD) para simular o escoamento e o desempenho do propulsor, combinado com a aplicação da analogia acústica de Ffowcs Williams-Hawkings para o cálculo da propagação das ondas acústicas. Para validar o modelo desenvolvido numericamente com CFD, os resultados de empuxo do propulsor são comparados com valores experimentais obtidos em testes no Tanque de Provas de Reboque do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Palavras-chave: Submarino. Propulsor. Ruído hidrodinâmico. CFD. Analogia acústica.

Abstract: Acoustic discretion is crucial for the survival and operational effectiveness of submarines. Among the various types of emitted noise, hydrodynamic noise is directly related to the operation of the propeller, the shape of the hull, and its appendages. This study proposes a numerical method to assess hydrodynamic noise emission from a propeller located aft of a simplified submarine model geometry. The method employs CFD to simulate the flow and performance of the propeller, coupled with the application of the Ffowcs Williams-Hawkings acoustic analogy to calculate the propagation of acoustic waves. The numerical model is validated by comparing the propeller thrust results with experimental data obtained from tests in the Towing Tank at the Institute of Technological Research (Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT).

Keywords: Submarine. Propeller. Hydrodynamic noise. CFD. Acoustic analogy.

3. Capitão de Mar e Guerra (RM1-EN). E-mail: rsbragio@umich.edu

<sup>1.</sup> Ajudante da Seção de Hidrostática e Hidrodinâmica do Centro de Projetos de Sistemas Navais, São Paulo, SP - Brasil. E-mail: bruno.pegoraro@marinha.mil.br / helio.correa@marinha.mil.br

<sup>2.</sup> Pesquisador do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, SP - Brasil. E-mail: amkogishi@ipt.br

<sup>4.</sup> Professor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP - Brasil. E-mail: alesimos@usp.br

## 1. INTRODUÇÃO

Submarinos são projetados para operar de maneira discreta, de modo a evitar sua detecção por sonares inimigos. A importância dessa característica não pode ser subestimada: em um ambiente onde a detecção precoce pode significar a diferença entre sucesso e falha de uma missão, manter um perfil acústico baixo é essencial. Submarinos que operam com níveis mínimos de ruído possuem uma vantagem tática significativa, pois tornam-se menos vulneráveis à localização por sonares inimigos.

Uma das principais fontes de ruído em submarinos é o seu propulsor. O avanço na tecnologia dos propulsores tem sido uma resposta direta à necessidade de maior discrição acústica. O desenvolvimento de propulsores silenciosos não só melhora a discrição do submarino, como também evita a contaminação do ambiente acústico, minimizando a interferência com o sistema de detecção do próprio submarino. É importante ressaltar, ainda, que os novos conhecimentos e soluções de engenharia obtidos nesse assunto têm desdobramentos importantes em toda a indústria naval, uma vez que contribuem para a redução da poluição acústica e de seus efeitos nos ecossistemas marinhos.

Entre os principais avanços tecnológicos, destacam-se o emprego de propulsores com grande número de pás, grande diâmetro e baixa rotação, diminuindo o carregamento sobre as pás e os vórtices gerados, e o uso de um ângulo de *skew* elevado. A redução das vorticidades emitidas diminui a intensidade do ruído hidrodinâmico. Da mesma forma, propulsores com alto ângulo de *skew* reduzem a emissão acústica gerada durante a rotação, pois diminuem a magnitude dos esforços vibratórios. No entanto, essas vantagens vêm acompanhadas de desafios significativos, como dificuldades na fabricação e problemas de resistência mecânica associados ao aumento do número de pás e a ângulos de *skew* muito elevados (KERWIN; HADLER, 2010).

Atualmente, ainda existe uma lacuna tanto em modelos teóricos quanto computacionais para lidar com o problema da hidroacústica (IANNIELLO; MUSCARI; DI MASCIO, 2013), mesmo considerando avanços devidos à robustez atual dos computadores modernos, juntamente com a confiabilidade dos códigos comerciais de *computational fluid dynamics* (CFD) para projeto e análise de propulsores e a disponibilidade de métodos numéricos para acústica. Como resultado, a resposta hidroacústica de propulsores convencionais geralmente não é avaliada na etapa de projeto, quando apenas parâmetros como empuxo, torque e eficiência são considerados. De fato, apenas recentemente foram feitos alguns avanços, mas ainda não existe uma metodologia consolidada para estimar as emissões de ruído. Adicionalmente, ao contrário das emissões acústicas para navios de superfície (IMO, 2023), há uma escassez de resultados experimentais e numéricos publicados para propulsores de veículos submersos, especialmente quando não há cavitação, conforme mencionado em Ianniello, Muscari e Di Mascio (2013).

Neste contexto, um propulsor com alto ângulo de *skew* e grande número de pás foi escolhido para estudar seu ruído submerso. O primeiro passo para o estudo consiste na modelagem em CFD do propulsor na popa de um modelo com geometria simplificada de submarino. A validação do seu desempenho é realizada comparando-se os valores obtidos numericamente com aqueles medidos em ensaios experimentais. Em seguida, aplica-se a analogia acústica de Ffowcs Williams-Hawkings (FFOWCS WILLIAMS; HAWKINGS, 1969) para estimar o ruído submerso. Esse método permite a análise da discrição acústica do propulsor e contribui para o avanço das metodologias de avaliação de ruído em submarinos.

## 2. MÉTODO NUMÉRICO

O método numérico empregado neste estudo propõe o acoplamento de dois modelos matemáticos distintos. Primeiramente, busca-se a solução no domínio do tempo para o escoamento ao redor de um casco simplificado de submarino e do propulsor, aplicando-se a abordagem *Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations* (RANS) e o método dos volumes finitos. Uma vez obtida a solução do escoamento, ela é utilizada como entrada para o modelo de analogia acústica. Esta segunda etapa aplica a analogia acústica de Ffowcs Williams-Hawkings (FWH) para calcular a propagação das ondas acústicas, permitindo a estimativa do ruído produzido.

Esse acoplamento entre a simulação do escoamento e o modelo acústico possibilita uma análise integrada e eficiente, reduzindo a necessidade de malhas excessivamente refinadas em áreas distantes da região onde o ruído é gerado. Assim, é possível minimizar o custo computacional sem comprometer a precisão dos resultados, concentrando o refinamento da malha nas áreas críticas.

#### 2.1. O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

O modelo hidrodinâmico visa encontrar a solução para as equações da conservação da massa (continuidade) e de momento linear no domínio fluido. O balanço de massa em um volume de controle pode ser expresso pela equação da continuidade (Equação 1):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \tag{1}$$

Onde:

 $\rho$ : a massa específica,

 $ec{
u}$  : o vetor velocidade

t: o tempo.

A equação da conservação de momento linear é formulada como Equação 2:

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}x\vec{v}) = -\nabla \cdot (pI) + \nabla \cdot T + \vec{f_b}$$
(2)

Onde:

 $f_b$ : forças de campo, como a gravidade; p: a pressão; T: o tensor de tensões viscosas.

Os métodos numéricos comumente transformam essas equações diferenciais em um sistema algébrico de equações. No método dos volumes finitos, essa transformação resulta na discretização das equações de governo no espaço e no tempo (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2016). Todas as equações de conservação podem ser escritas em termos de uma equação de transporte genérica. Integrando essa equação em um volume de controle V e aplicando o teorema da divergência de Gauss, obtém-se a forma integral da equação de transporte (Equação 3):

$$\frac{d}{\partial t} \int_{V} \rho \phi dV + \int_{A} \rho \vec{v} \phi \cdot dA = \int_{A} \Gamma \nabla \phi dA + \int_{V} S_{\phi} dV \quad (3)$$

Onde:  $\phi$ : a propriedade escalar transportada; A: a área da superfície do volume de controle; dA: o vetor de área.

Ao escolher  $\phi$  como o algarismo 1, ou como as componentes da velocidade  $v_x, v_x$  ou  $v_z$ , selecionando-se o coeficiente difusivo  $\Gamma$  e o termo fonte  $S_{\phi}$  apropriados, obtêm-se formas específicas das equações diferenciais parciais de massa e momento.

No método dos volumes finitos, as integrais de superfície são avaliadas em termos dos valores das variáveis em pontos da superfície de cada elemento. Usando a regra do ponto central, que representa uma aproximação de segunda ordem, a integral de área pode ser aproximada como o produto do valor da variável no centro da área pelo valor da área (Equação 4):

$$\int_{A} J^{\phi} \cdot dA \sim \sum_{f} J_{f}^{\phi} \cdot a_{f} \tag{4}$$

Onde:

$$\begin{split} J^{\phi} &= \rho \vec{v} \phi \text{ ou } J^{\phi} = \Gamma \nabla \phi; \\ a_f: \text{ o vetor de área da face } f \text{ do elemento;} \\ \Sigma_f: \text{ a somatória sobre todas as faces do elemento.} \end{split}$$

As integrais de volume são aproximadas pelo produto entre o valor do termo fonte no centro de volume do elemento  $S_{\phi 0}$ pelo próprio volume do elemento  $V_0$ , esultando também em uma aproximação de segunda ordem (Equação 5):

$$\int_{V} S_{\phi} dV \sim S_{\phi 0} V_0 \tag{5}$$

Aplicando essas aproximações, obtém-se a seguinte equação de transporte discretizada (Equação 6):

$$\frac{d}{dt}(\rho\phi V)_0 + \sum_f [\rho\phi(\vec{v}\cdot a)]_f = \sum_f [\Gamma\nabla\phi\cdot a]_f + (S_\phi V)_0 \tag{6}$$

Finalmente, os valores das variáveis nas faces dos elementos, que não são conhecidos diretamente, são aproximados por interpolação usando os valores nos centros dos volumes de cada elemento.

#### 2.2. MODELO HIDROACÚSTICO

O modelo hidroacústico é fundamentado na analogia acústica de FWH (FFOWCS WILLIAMS; HAWKINGS, 1969), que é um rearranjo das equações da continuidade e de quantidade de movimento linear. Essa abordagem utiliza derivadas generalizadas para incluir superfícies que podem estar tanto estacionárias como em movimento dentro do domínio fluido.
Se considerarmos um corpo arbitrário movendo-se em um fluido, pode-se definir uma função f = 0 para representar a superfície desse corpo. Especificamente, f > 0 define a região externa ao corpo, e f < 0 representa o seu interior. Com essa definição, introduzem-se novas variáveis que são expressas em termos da função de *Heaviside*,  $H_s(f)$ , como, por exemplo uma nova variável de massa específica,  $\rho H_s$ . A função de *Heaviside* é definida como  $H_s = 1$  para f > 0 e  $H_s = 0$  para f < 0. Estendendo-se esse conceito para as demais variáveis do escoamento (velocidade, pressão), e definindo-se n como a normal unitária da superfície do corpo, é possível derivar a equação de FWH como (GLEGG; DEVENPORT, 2017) (Equação 7):

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (p'H_s) - \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} (p'H_s) = \frac{\partial}{\partial t} \{ \left[ \rho(u_j - V_j) + \rho_0 V_j \right] n_j \delta(f) |\nabla f| \}$$

$$- \frac{\partial}{\partial x_i} \{ \left[ \rho u_i(u_j - V_j) + p_{ij} \right] n_j \delta(f) |\nabla f| \} + \frac{\partial^2}{\partial x_i x_j} (T_{ij}H_s)$$
(7)

Onde:

p': a pressão acústica;

 $T_{ij} = u_i u_j + p_{ij} - (\rho - \rho_0) c_0^2 \delta_{ij}$ : o tensor de *Lighthill*; c<sub>0</sub> : a velocidade do som no fluido;

 $\rho_0$ : a massa específica do fluido não perturbado;

 $u_i$  e  $v_i$ : as componentes da velocidade do fluido e da superfície do corpo, respectivamente;

 $P_{ij} = (p - p_0)\delta_{ij} - \sigma_{ij}$ : o tensor de tensões compressivas, com  $\delta_{ij}$  sendo o delta de Kronecker;  $p_0$  a pressão do fluido não perturbado, e  $\sigma_{ij}$  o termo de tensões viscosas.

No lado direito da equação acima, há três termos distintos: os dois primeiros são, respectivamente, o monopolo e o dipolo, que contêm a função do delta de Dirac,  $\delta(f)$ , e representam fontes de ruído que atuam na descontinuidade da região fluida, representada pela superfície do corpo (f = 0). O último termo é o quadrupolo, o qual contém a função de *Heaviside*,  $H_s(f)$ , representando fontes de ruído que ocorrem externas à superfície do corpo (na região do fluido). Quanto ao significado físico dos termos na equação de FWH, podemos descrever cada um deles da seguinte forma:

 Ruído de monopolo: o primeiro termo do lado direito representa o ruído gerado pelo deslocamento forçado do fluido pela passagem de um corpo. Assim, fisicamente ele representa tanto o ruído gerado pelo deslocamento linear de um corpo como pela rotação de um hélice, por exemplo;

- Ruído de dipolo: esse termo está relacionado ao ruído gerado pelas forças que o corpo exerce sobre o fluido;
- Ruído de quadrupolo: esse termo representa os efeitos não lineares, como vorticidade e turbulência, no domínio fluido.

Os termos monopolo e dipolo são lineares e exigem o cálculo de integrais de superfície, enquanto o termo quadrupolo é não linear e requer a integração de volume.

Embora a equação de FWH tenha sido originalmente apresentada para uma superfície impermeável, essa superfície não precisa necessariamente coincidir com a superfície de um corpo. A solução da equação de FWH para uma superfície porosa requer a integração da equação de FWH sobre uma superfície fictícia externa ao corpo em consideração. A solução envolve o uso das funções de Green e a introdução de duas variáveis auxiliares  $U_i$  e  $L_i$  (DI FRANCESCANTONIO, 1997) (Equações 8 e 9):

$$U_{i} = u_{i} + \left(\frac{\rho}{\rho_{0}} - 1\right)(u_{i} - v_{i})$$
(8)

$$L_i = P_{ij}n_j + \rho u_i(u_n - v_n) \tag{9}$$

Com essas variáveis, a solução da formulação porosa de FWH pode ser escrita como (IANNIELLO; MUSCARI; DI MASCIO, 2013) (Equação 10):

$$4\pi p'(x,t) = \frac{\partial}{\partial t} \int_{S} \left[ \frac{\rho_0 U_n}{r |1 - M_r|} \right]_{\tau} dS + \frac{1}{c_0} \frac{\partial}{\partial t} \int_{S} \left[ \frac{L_r}{r |1 - M_r|} \right]_{\tau} dS + \int_{S} \left[ \frac{L_r}{r^2 |1 - M_r|} \right]_{\tau} dS + p'_Q(x,t)$$
(10)

Onde:

*r* : a distância entre a fonte de ruído e o receptor, o subscrito *r* denotando a avaliação da variável na direção do receptor;  $M_r = u_r/c_{0: 0}$  número de *Mach* local;

 $\tau$ : denota a avaliação da integral no instante de emissão.  $p'_Q(x,t)$ : a contribuição dos efeitos não lineares fora da superfície porosa.

Para uma análise hidroacústica precisa, é essencial incluir o termo quadrupolo, pois os termos lineares tendem a decair rapidamente. No entanto, o cálculo do termo quadrupolo é computacionalmente dispendioso, uma vez que envolve uma integral de volume no domínio fluido. Contudo, ao considerar uma superfície porosa que abrange todos os efeitos não lineares relevantes, é possível incluir os termos não lineares nos termos lineares sem realizar a integral de volume. Dessa forma, a contribuição do último termo pode ser desconsiderada, simplificando a análise para integrais de superfície no cálculo do ruído (IANNIELLO; MUSCARI; DI MASCIO, 2013), reduzindo assim o custo computacional da solução.

## 3. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO CASCO E DO HÉLICE

O propulsor MOD5, utilizado nesta pesquisa, é um hélice de sete pás (BARNACK NETO et al., 2018), desenvolvido com objetivos acadêmicos e experimentais, originalmente projetado pelo Laboratório de Hidrodinâmica, localizado nas dependências do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP). O MOD5 foi projetado para operar a ré de um veículo autônomo submerso em escala de 1:1.588 do modelo DARPA *Suboff* (GROVES; HUANG; CHANG, 1989). O seu projeto foi realizado utilizando as teorias de linha de sustentação (LERBS, 1952) e de superfície de sustentação (KERWIN, 1973). As principais características geométricas do hélice estão contidas na Tabela 1.

O formato do modelo simplificado do casco usado na modelagem e nos experimentos é baseado na Série 58 (GERTLER, 1950). Sua geometria simplificada foi projetada para minimizar custos de fabricação, visando o seu emprego em testes experimentais para determinação do empuxo, enquanto ainda proporciona uma esteira não uniforme para a operação do hélice. As principais características geométricas do modelo estão apresentadas na Tabela 2, enquanto o modelo computacional do conjunto modelo-propulsor é mostrado na Figura 1.

Tabela	1. Princi	pais c	aracterísticas	geométricas	do	MOD5
Iusciu		puis c	anactensticas	geometricus	au	11005.

Número de pás	7
Diâmetro	18,89 cm
Razão Passo/Diâmetro	1,216
<i>Rake</i> total	0 m
Razão de Área Expandida	0,608
Razão Bosso/Diâmetro	0,200
Ângulo de <i>skew</i> na ponta da pá	20°
Fonte: Barnack Neto et al. (2018).	

4. CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

O *software* Star-CCM+ (2018), que emprega o método dos volumes finitos para cálculos hidrodinâmicos e usa a analogia de FWH para cálculo do campo acústico, foi utilizado para conduzir as simulações numéricas. O domínio computacional foi definido como um cilindro cujas dimensões são funções do comprimento do modelo, como mostrado na Figura 2. A superfície porosa utilizada para obter os dados da solução do CFD para o modelo de analogia acústica, baseado nas equações de FWH, engloba o conjunto modelo-hélice, estendendo-se até quatro diâmetros para a esteira do conjunto, de forma a captar não só o ruído hidrodinâmico produzido pela interação casco-hélice, mas também aquele produzido pela própria esteira devido aos vórtices nela contidos.

# Tabela 2. Principais características geométricas do modelo.

Comprimento	62,4 cm
Diâmetro	13,0 cm
Perfil dos hidroplanos	NACA0020
Comprimento dos hidroplanos	20,0 cm



Figura 1. Modelo utilizado para simulações numéricas.

Para simular a rotação do hélice, foi aplicado o método da malha deslizante em uma região próxima ao propulsor (região rotativa). Outros detalhes da configuração das simulações, como o modelo de turbulência e o esquema de convecção utilizados, estão na Tabela 3. Empregou-se uma malha hexaédrica não estruturada, complementada por uma camada prismática de 35 elementos adjacente às superfícies do casco e do hélice, visando obter uma solução mais precisa da camada limite, aumentando assim a precisão da solução numérica. Detalhes da malha podem ser vistos na Figura 3.

# 5. CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO EXPERIMENTAL

Os ensaios para determinação do empuxo do hélice foram realizados no Tanque de Provas de Reboque do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), o qual possui 220 metros de comprimento, com seção transversal de 6.6 metros de largura e 3.5 metros de profundidade (Figura 4).





#### Tabela 3. Configuração numérica.

Modelo de turbulência	k-ω SST
Tipo de <i>Solver</i>	Segregado
Esquema de convecção	<i>Upwind</i> de segunda ordem
$\Delta$ t	3,44E-04 s
Número de subiterações por passo de tempo	10
Número de revoluções simulado	20

O modelo simplificado do casco foi fabricado em polímero tipo ABS no IPT com uma impressora 3D (Figura 5) e projetado para ser instalado ao redor do motor elétrico Marine Sports Phantom de 44 libras, equivalente a um motor de popa de 1,5 HP. O controle do motor é conectado por uma haste vertical em aço inox. A parte da haste que está submersa, suportando o modelo, foi revestida com uma carenagem de perfil hidrodinâmico



Figura 3. Detalhe da malha utilizada para o domínio fluido (acima) e para o modelo (abaixo).



Figura 4. Tanque de Provas de Reboque do IPT.

para suavizar o escoamento, reduzir vibração e a formação de vórtices, que poderiam causar ruídos adicionais indesejados. O modelo do casco com o hélice instalado está apresentado na Figura 6, enquanto uma imagem do modelo montado no Tanque de Provas de Reboque do IPT é mostrada na Figura 7.



Figura 5. Processo de fabricação do modelo em impressora 3D.



Figura 6. Modelo fabricado com o hélice instalado ao lado do controle e do *display* digital para medir rotação.



**Figura 7.** Modelo montado no Tanque de Provas de Reboque do IPT.

Uma parte essencial do ensaio é o controle e a medição da rotação do hélice. Para o controle, foi empregado um regulador de tensão com potenciômetro, permitindo ajustes finos e precisos. Para a medição da rotação, foi instalado internamente ao casco, junto ao eixo do motor, um sensor de rotação que utiliza ímã. Esse sensor detecta variações no campo magnético gerado pela rotação do ímã, convertendo essas variações em sinais elétricos que são utilizados para monitorar a rotação através de um *display* digital.

O empuxo foi medido utilizando uma célula de carga conectada à parte superior da haste do motor. Com o hélice instalado, a leitura da célula de carga é igual à resultante entre o empuxo gerado pelo hélice e o arrasto resultante do modelo e da haste. Portanto, para medir o empuxo com precisão, é necessário medir o arrasto de forma isolada. Para isso, foram realizadas corridas com o modelo sem o hélice, como pode ser visto na Figura 8.



Figura 8. Modelo sem hélice.

## 6. COMPARAÇÃO DE EMPUXO OBTIDO NUMERICAMENTE (CFD) E NO ENSAIO

Para comparação e validação do modelo numérico com o ensaio, foram realizadas simulações e corridas no Tanque de Provas de Reboque do IPT com as seguintes características:

- Velocidade de avanço do carro e velocidade de entrada no CFD: 1,25 m/s;
- Rotação do hélice: 484 rpm.

A Tabela 4 apresenta os dados medidos de empuxo do hélice para comparação. Os resultados indicam que o modelo do CFD tem uma correlação satisfatória com os dados experimentais. A Figura 9 apresenta o campo de vorticidade calculado pela simulação.

Na analogia acústica de FWH, o termo de dipolo está associado ao carregamento do hélice. Portanto, a precisão na modelagem do empuxo, como demonstrado pelo modelo CFD, reforça a confiabilidade dos resultados acústicos.

# 7. VALIDAÇÃO DO MODELO DE ANALOGIA ACÚSTICA

Após a validação do modelo de CFD com os resultados do empuxo gerado pelo propulsor, o próximo passo é validar o modelo de analogia acústica utilizando as equações de

#### Tabela 4. Comparação entre empuxo calculado via CFD e empuxo medido pelo ensaio.

CFD	25,0 N
Ensaio	22,0 ± 0,5 N



Figura 9. Campo de vorticidade.

FWH. Para isso, a flutuação de pressão obtida pela solução de escoamento através do modelo de CFD será comparada com a flutuação calculada usando a abordagem de superfície porosa aplicada à analogia acústica de FWH. Como explicado no item 2, a solução do escoamento obtida em CFD (velocidade, pressão, massa específica) para cada instante de tempo é utilizada como dado de entrada para a analogia acústica. Assim, para pontos próximos à fonte de ruído, a solução da analogia acústica deve ser igual à do CFD. Para pontos distantes, onde a malha usualmente é mais grosseira, a solução do campo acústico via CFD é afetada por problemas de difusão numérica. Por esse motivo, emprega-se a analogia de FWH como ferramenta de propagação acústica para o campo distante.

A validação é realizada em três pontos distintos, situados próximos ao propulsor e imediatamente fora da superfície porosa. Esses pontos são estrategicamente escolhidos para capturar a variação espacial das flutuações de pressão e proporcionar uma visão detalhada do ruído em torno do hélice. A Tabela 5 apresenta as coordenadas dos pontos de medição em função do diâmetro do hélice, com a origem do sistema de coordenadas posicionada no centro do plano de rotação do hélice.

A comparação entre os resultados de flutuação de pressão obtidos por CFD e aqueles calculados através da analogia acústica de FWH, apresentados na Figura 10, permite avaliar a precisão do modelo acústico e verificar a consistência dos resultados. Essa validação é crucial para assegurar que o modelo de FWH está corretamente representando o comportamento acústico nas proximidades da fonte de ruído.

Portanto, essa etapa de validação não apenas confirma a precisão da solução e a aplicabilidade da analogia acústica de FWH, mas também permite uma previsão mais detalhada do ruído em pontos distantes com um custo computacional menor. Ao validar a analogia acústica nas proximidades do modelo, pode-se utilizá-la para calcular o ruído em regiões mais afastadas sem a necessidade de um refinamento elevado da malha do CFD, facilitando a análise acústica à distância com eficiência computacional otimizada.

#### Tabela 5. Pontos para comparação entre RANS e FWH.

P1	(-0,5D; 0; 1,0D)
P2	(0,0D; 0; 1,0D)
Р3	(0,5D; 0; 1,0D)

## 8. PREDIÇÃO DO RUÍDO HIDRODINÂMICO PARA PONTOS DISTANTES

Com a validação da analogia acústica estabelecida, avançamos para o cálculo do perfil acústico em pontos mais distantes da fonte. Para essa análise, utilizamos o Nível de Pressão Sonora (*Sound Pressure Level* – SPL) como referência para comparação. O SPL expressa a intensidade de um sinal acústico em relação a um nível de referência predefinido em decibéis (dB), conforme a equação a seguir (Equação 11)



Figura 10. Comparação da flutuação de pressão para os pontos P1, P2 e P3.

$$SPL = 20\log_{10}(p_{rms}/p_{ref}) \tag{11}$$

Onde:

*Prms*: a raiz quadrática média (*root mean square*) da pressão sonora emitida;

 $p_{ref:a}$  pressão sonora de referência, comumente definida como  $1 \ \mu Pa$  na água.

A Figura 11 ilustra a comparação do SPL em três pontos no plano do propulsor. A distância desses pontos é dada em função do diâmetro do hélice, proporcionando uma visualização clara da distribuição do ruído ao longo de diferentes distâncias. Na parte superior da Figura 11, é mostrado o cálculo do SPL utilizando a pressão acústica, calculada pelo sinal obtido pela analogia acústica de FWH através de uma *Fast Fourier Transform* (FFT). Nota-se que, como esperado, a frequência que apresenta o maior nível sonoro é a primeira frequência de passagem das pás (*blade passing frequency* — BPF), igual a 56,5Hz, que corresponde ao produto do número de pás pela rotação do eixo. Na parte inferior da Figura 11, é



Figura 11. Comparação do SPL para diferentes distâncias: análise via FFT do sinal acústico (acima) e análise via banda de terço de oitava (abaixo).

apresentada a pressão acústica utilizando bandas de terço de oitava. Muito usada em medições de ruído ambiental e controle acústico, a análise de banda de terço de oitava expressa o nível de pressão acústica em bandas de frequências que guardam razão constante entre si. Enquanto análises do tipo FFT permitem a identificação de fenômenos relacionados a frequências individuais, as análises com banda de terço de oitava permitem avaliar a emissão de ruído em termos mais gerais de níveis de potência acústica.

## 9. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste estudo, aplicou-se um método integrado utilizando CFD e a analogia acústica de FWH para estimar o ruído submerso de um propulsor a ré de um casco com geometria simplificada de submarino. O empuxo calculado pelo CFD apresentou aderência satisfatória com relação ao medido em ensaio experimental. O modelo de analogia acústica foi validado por meio da comparação com a flutuação de pressão do CFD, mostrando bons resultados. A partir disso, buscou-se estudar como o ruído advindo do conjunto modelo-hélice varia com a distância. O método proposto mostrou-se adequado e com grande potencial para ser incorporado nas fases de projeto. Como trabalho futuro, pretende-se medir experimentalmente, no Tanque de Provas de Reboque, o ruído emitido utilizando-se um hidrofone, de forma a validar experimentalmente os valores de pressão sonora previstos através da modelagem numérica.

### AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) pela colaboração para realização dos ensaios experimentais e ao Laboratório de Hidrodinâmica pela disponibilização do propulsor utilizado neste estudo.

# REFERÊNCIAS

BARNACK NETO, W.; MOURA, A.; SILVA JUNIOR, H. C.; GIANI PATTARO JUNIOR, R.; SBRAGIO, R. Development of a propeller for an autonomous underwater vehicle with a hull geometry of the darpa suboff model. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 10., 2018, Salvador. *Anais* [...]. 2018.

DI FRANCESCANTONIO, P. A new boundary integral formulation for the prediction of sound radiation. *Journal of Sound and Vibration*, v. 202, n. 4, p. 491-509, 1997. https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0843

FFOWCS WILLIAMS, J. K. E.; HAWKINGS, D. L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, v. 264, n. 1151, p. 321-342, 1969. https://doi.org/10.1098/rsta.1969.0031

GERTLER, M. *Resistance experiments on a systematic series of streamlined bodies of revolution:* for application to the design of high-speed submarines. Bethesda: David Taylor Research Center Report C-297, 1950.

GLEGG, S.; DEVENPORT, W. Aeroacoustics of low Mach number flows. Londres: Academic Press, 2017.

GROVES, N. C.; HUANG, T. T.; CHANG, M. S. *Geometric characteristics* of *darpa suboff models (DTRC model Nos. 5470 and 5471)*. Bethesda: David Taylor Research Center Report SHD-1298-01, 1989.

IANNIELLO, S.; MUSCARI, R.; DI MASCIO, A. Ship underwater noise assessment by the acoustic analogy. Part I: Nonlinear analysis of a marine propeller in a uniform flow. *Journal of Marine Science and Technology*, v. 18, n. 4, p. 547-570, 2013. https://doi.org/10.1007/s00773-013-0227-0

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). Revised guidelines for the reduction of underwater noise from shipping to address adverse impacts on marine life (MEPC.1/Circ. 906). Londres: IMO, 2023.

KERWIN, J. E. Computer techniques for propeller blade section design. *International Shipbuilding Progress*, v. 20, n. 227, p. 227-251, 1973. https://doi.org/10.3233/ISP-1973-2022701

KERWIN, J. E.; HADLER, J. B. *Principles of naval architecture series:* propulsion. Nova Jersey: Society of Naval Architects, 2010.

LERBS, B. Y. H. W. Moderately loaded propellers with finite number of blades and an arbitrary distribution of circulation. *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, v. 60, p. 77-123, 1952.

MOUKALLED, F.; MANGANI, L.; DARWISH, M. *The finite volume method in computational fluid dynamics*. Springer International Publishing, 2016.

STAR-CCM+ 13.04.010-R8. Theory Guide. 2018.

# OBTENÇÃO DA RESPOSTA ESTRUTURAL DE MEIOS NAVAIS SUJEITOS A EXPLOSÕES SUBMARINAS

Structural response of naval ships subjected to underwater explosions

César Augusto Bernardi Werle<sup>1</sup>

Resumo: Após a Segunda Guerra Mundial, iniciou-se uma grande demanda para aumentar a resistência dos meios navais ao choque em razão de explosões submarinas. A detonação destas cargas causa altos deslocamentos, velocidades e acelerações na estrutura e nos equipamentos a bordo dos navios. Assim, é de extrema importância para as Marinhas conhecerem as vulnerabilidades e os limites das estruturas navais e equipamentos suscetíveis ao choque gerado por explosões subaquáticas. Este trabalho tem por objetivo obter a resposta dinâmica da estrutura de uma embarcação (em termos de deslocamentos, velocidades e acelerações) sujeita a explosões submarinas em um ambiente virtual. Utilizando a metodologia de dinâmica explícita disponível na plataforma do software Ansys®, modelou-se o fenômeno físico e, após a definição das condições iniciais e de contorno inseridas no modelo, foi possível extrair os deslocamentos, as velocidades e as acelerações impostas pelo efeito explosivo em determinados pontos de interesse na estrutura de uma embarcação genérica. Simplificações foram necessárias, visando à otimização do hardware empregado na solução do problema proposto. Como resultado do emprego das três cargas explosivas distintas (88, 600 e 1.850 kg) de PETN 1.5, observou-se o aumento da resposta nos pontos selecionados conforme o aumento do peso da carga explosiva empregada. Ao fim do estudo, pôde-se concluir que a simulação computacional moderna pode auxiliar na identificação de pontos vulneráveis de meios navais, possibilitando melhorar a resistência ao choque tanto em navios operativos e quanto em fase de projeto. Cabe destacar ainda que, utilizando--se as modernas ferramentas computacionais disponíveis, são obtidas as respostas da estrutura naval sujeita a explosões submarinas de maneira relativamente rápida e a um custo aceitável.

**Palavras-chave:** Explosões submarinas. Resposta estrutural. Dinâmica explícita.

Abstract: After World War II, a huge effort to increase the Underwater Explosions (UNDEX) shock resistance of naval ships was performed. The detonation of those charges results in bigger displacements, velocities and accelerations at the on-board equipment and structures. So, it is very important to the Navies to know the vulnerabilities and the limits of structure and equipment subjected to the shock by the UNDEX. The main goal of this work is to obtain the dynamic response of a generic ship subjected to UNDEX in a virtual environment. The goal of this work is to obtain the ship dynamic structural response (displacements, velocities and accelerations) subjected to UNDEX in a virtual environment. Using the explicit dynamic method available in the Ansys® platform, the virtual modeling of the UNDEX physical phenomena was performed and, after the definitions of the initial and boundary conditions, it was possible to determine the displacements, velocities and accelerations imposed by the explosive effect at the points of interest in a catamaran virtual structure. It was necessary to do some simplifications in the virtual model to optimize the hardware employed in the proposed problem. Discrete-event simulations using three distinct explosive loads (88, 600 and 1,850 kg) showed an increase response in the selected points with the rising of the explosive charge employed. At the end of this study, it can be concluded that the modern computational simulations can assist to identify points of vulnerability in the naval ships, allowing to improve the shock resistance of the ships in service or in the design phase. It can be highlighted that, using the modern available computational tools, the structural naval response subjected to UNDEX is obtained relatively quickly and with an acceptable financial cost.

Keywords: Underwater explosions. Structural response. Explicit dynamics.

1. Capitão de Corveta (EN). Ajudante da Divisão de Auxiliares da Diretoria de Engenharia Naval, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: cesar.werle@marinha.mil.br

## **1. INTRODUÇÃO**

No período após a Segunda Guerra Mundial houve uma grande demanda para aumentar a resistência dos meios navais ao choque mecânico oriundo de explosões submarinas (KEIL, 1961). Uma intensa pesquisa foi conduzida, especialmente pela Marinha dos Estados Unidos, com o intuito de prover melhor proteção aos navios e superar o problema de choque, causador de inúmeras falhas estruturais e em equipamentos naquele conflito global. Essas explosões causam altos deslocamentos, velocidades e acelerações na estrutura da embarcação e, por conseguinte, nos equipamentos a bordo (SZTUROMSKI, 2015).

Diante desta necessidade, importante desenvolvimento foi realizado tanto no sentido de entender a cinemática das explosões submarinas e suas consequências danosas nos meios navais, quanto realizando testes reais com meios navais (BRENNER, 2007) — chamados de *Full Ship Shock Trial* (FSST) — e também, mais recentemente, com o grande progresso na área computacional, a realização de testes virtuais conforme citados em Schneider e Shin (2003), em Didoszak (2004) e Bradbeer (2013).

Utilizando-se então essas novas tecnologias computacionais aplicadas ao método de elementos finitos (MEF), entre elas a dinâmica explícita, disponível na plataforma do *software* comercial Ansys<sup>®</sup>, modelou-se o fenômeno físico da explosão submarina. Tal modelagem basicamente foi composta do modelo virtual de um meio naval, do explosivo e do meio aquático no qual o fenômeno ocorre.

Após a definição das condições iniciais e de contorno impostas no modelo, foi possível executar o *solver* do *software* para então se obter a resposta da estrutura modelada em termos de deslocamentos, velocidades e as acelerações impostas pelo efeito explosivo em determinados pontos de interesse.

## 2. A CINEMÁTICA DAS EXPLOSÕES SUBMARINAS

Explosões submarinas são geradas por uma ampla variedade de cargas. Exemplos de explosivos submersos podem ser encontrados em Szturomski (2015), entre os quais podemos citar: minas de flutuação, minas de fundeio, minas de fundo e minas-torpedo. Quanto ao tipo de sensor de detonação, são mencionados os de diferença de pressão, campo magnético, potencial elétrico e campo hidrodinâmico.

Essas cargas submarinas, quando detonadas, causam um fenômeno físico complexo, pois trata-se da propagação de energia de grande intensidade, imersa em um meio fluido, em um curto espaço de tempo e, quando a onda de pressão incide sobre o alvo, ocorre também uma interação fluido-estrutura, gerando não -linearidades. Cole (1948) define então que, instantaneamente após a detonação, surge a onda de choque, sucedidas pela primeira e a segunda ondas de pressão. A duração dessas ondas é extremamente pequena (decaindo na ordem de milissegundos), afetando a estrutura do casco e os equipamentos de bordo. Já a migração da bolha gasosa possui um decaimento mais demorado, afetando principalmente a quilha mediante vibrações induzidas. Tais fenômenos podem ser visualizados na Figura 1.

Um fator importante na quantificação de uma explosão submarina é o fator de choque (Z), o qual fornece, conforme Reid (1996), informação sobre a severidade da onda de choque que atingirá o meio naval, conforme a Equação 1. A Figura 2 ilustra as variáveis apresentadas na referida equação:

$$Z = \frac{W^n}{R} \cdot \frac{1 + \operatorname{sen}(\theta)}{2} \tag{1}$$

Em que:

*W*: a massa de explosivo empregada (kg);

*R*: a distância do centro da carga explosiva à quilha;

heta: o ângulo entre a linha horizontal da carga explosiva e a quilha da embarcação;

*n*: um coeficiente empírico, obtido de experimentos de explosão submarina, sendo para Cole (1948) e ABS (2022) n = 1/3.



Figura 1. Cinemática do fenômeno físico de uma explosão submarina.

## 3. EFEITOS DAS EXPLOSÕES SUBMARINHAS NOS MEIOS NAVAIS

Conforme já mencionado sobre os danos na estrutura e equipamentos decorrentes de uma explosão submarina, Reid (1996) observa que a onda de choque percorre o casco do navio; parte de sua energia é transmitida ao caso e outra parte é transmitida às anteparas e conveses do navio a uma relativa velocidade de translação. Nas regiões rígidas do navio, como as anteparas feitas em aço, a velocidade é transmitida com baixa atenuação para os conveses superiores. Segundo o autor, a velocidade transmitida entre conveses geralmente varia de 20 a 30%. Isto explica a variação da resposta dinâmica à medida que a velocidade percorre o meio naval tanto no sentido proa-popa quanto no sentido quilha até a superestrutura.

Kok (1994) então afirma que melhorias na integridade estrutural e do casco são necessárias. Essas melhorias podem ser alcançadas por meio de um projeto estrutural prevendo as altas cargas oriundas de uma explosão submarina, da seleção de melhores e mais resistentes materiais, ou por meio da inserção de proteção balística e/ou materiais compósitos.

Nesse contexto, a Marinha dos Estados Unidos vem submetendo os primeiros navios de determinada classe a explosões submarinas. Segundo Brenner (2007), esse teste, chamados de FSST, é realizado empregando-se 2/3 da resistência ao choque de projeto, com o intuito de verificar o nível de sobrevivência<sup>1</sup> do navio, sempre no regime elástico dos materiais constituintes.



Figura 2. Parâmetros do fator de choque de uma explosão submarina.

A Figura 3 mostra o porta-aviões USS Gerald R. Ford (CVN 78) realizando um evento de FSST, em 2021, para a verificação da resistência ao choque da estrutura e equipamentos.

Todavia, Schneider e Shin (2003) alertam que os FSST requerem anos de planejamento e de preparação, além de serem extremamente custosos. Por exemplo, testes com explosões submarinas realizados no USS John Paul Jones (DDG 53) em 1994, e no USS Whinston S. Churchill (DDG 81) em 2001, consumiram o total de US\$ 50 milhões.

No entanto, com o avanço da capacidade computacional ao longo dos anos, o evento do choque causado por explosões submarinas também passou a ser efetuado de forma virtual, em modelos que utilizam o Método de Elementos Finitos (MEF), o que vem contribuindo para a economicidade e relativa rapidez na execução desses testes.

## 4. MODELAGEM NUMÉRICA DO PROBLEMA PROPOSTO

No sentido da redução do custo e do tempo necessário empregado em um teste de FSST, foi utilizado o modelo virtual de um catamarã (Figura 4) com 29 metros de comprimento total x 9,57 metros de boca x 0,94 metro de calado, sendo a embarcação real utilizada para transporte de passageiros entre as cidades do Rio de Janeiro e Niterói. O deslocamento leve aproximado do modelo virtual é de 346 toneladas com estrutura



Fonte: disponível em: https://www.naval.com.br/ blog/2021/06/20/testes-de-choque-total-do-portaavioes-uss-gerald-r-ford-cvn-78/. Acesso em: 22 jun. 2021.

Figura 3. USS Gerald R. Ford (CVN 78) em um evento de Full Ship Shock Trial.

1. Do inglês "survivability" — característica de um navio militar e de sua tripulação de suportar os efeitos iniciais de um dano, continuando a executar suas funções primárias de combate

em aço. Cabe destacar que o emprego deste catamarã foi uma escolha por ele já ter sido testado anteriormente em outros trabalhos (Laboratório de Ensaios Dinâmicos e Análise de Vibração [LEDAV] da Universidade Federal do Rio de Janeiro [UFRJ]) e pela possibilidade de publicação dos resultados, sem informações sensíveis relacionadas a um navio de guerra.

Empregando a metodologia de dinâmica explícita disponível na plataforma do *software* Ansys<sup>®</sup>, modelou-se o fenômeno físico e, após a definição das condições iniciais e de contorno inseridas no modelo, foi possível extrair os deslocamentos, as velocidades e as acelerações impostas pelo efeito explosivo em determinados pontos de interesse na estrutura de uma embarcação genérica.

Para a apresentação dos resultados em termos de deslocamento, velocidade e, aceleração, foram considerados 11 pontos localizados acima do convés principal e 12 pontos



Figura 4. Modelagem virtual utilizada no trabalho.

abaixo do convés principal (Figuras 5a e 5b, respectivamente). Tais pontos representam locais onde poderão ser posicionados equipamentos vitais na embarcação, como itens do sistema de propulsão, sistema de geração de energia e aguada, equipamentos eletrônicos de controle e monitoração, sistema de combustível, entre outros. Cabe mencionar que esses pontos podem ser alterados conforme a necessidade do projeto, devido dada a flexibilidade do *software* utilizado (módulo de Dinâmica Explícita do Ansys<sup>®</sup>).

Após a modelagem tridimensional do problema proposto, que compreendeu o catamarã, o meio fluido e a carga de explosivo, foi gerada a malha dos referidos componentes na interface do submódulo *Mechanical*. Os elementos modelados são do tipo hexaédricos e tetraédricos de ordem linear (primeira ordem), sendo um requisito para a Dinâmica Explícita do Ansys<sup>®</sup>. Após a geração da malha, foram estabelecidas as condições iniciais e de contorno, quais sejam:

- O material do catamarã é o aço estrutural (tensão de escoamento de 290 MPa e tensão de ruptura de 470 MPa).
- O material do elemento explosivo é o tetranitrato de pentaeritrina (densidade 1.500 kg/m<sup>3</sup>) — PETN 1.5.
- O meio fluido foi considerado como água salgada.
- A velocidade relativa do meio fluido e a velocidade inicial do catamarã é nula.
- O contato entre os diferentes componentes estruturais do catamarã é do tipo colado (*bonded*).
- A face inferior do meio fluido possui restrição de movimento nos três eixos (deslocamento zero), simulando assim o leito marinho.
- O calado de 0,94 metro foi inserido manualmente no modelo.



Fonte: Werle (2023).

Figura 5. (A) Pontos acima do convés principal e (B) pontos abaixo do convés principal.

 A profundidade do explosivo é de 24 metros abaixo da quilha da embarcação.

Simplificações foram necessárias, visando à otimização do *hardware* empregado na solução do problema proposto, como por exemplo a remoção do passadiço do catamarã simulado, para reduzir o número de elementos da malha (e assim também reduzindo o custo computacional), visto que os maiores deslocamentos, velocidades e acelerações não ocorrem nos conveses superiores (SZTUROMSKI,2015). Maiores detalhes das simplificações adotadas podem ser consultas no trabalho completo de Werle (2023).

Em virtude de o modelo possuir 320.997 elementos e 86.098 nós, cabe mencionar que tal fato dificulta muito o teste de validação de forma direta, dado o alto tempo de processamento para o *hardware* disponível. Então, alternativamente, foi efetuada a validação do método utilizando-se um modelo mais simples, comparando--se uma placa metálica gerada no módulo de Dinâmica Explícita do Ansys<sup>®</sup> com um teste real citado no trabalho de Zhang *et al.* (2022). No presente trabalho, uma placa de raio r = 53 mm e de espessura t = 1,9 mm foi submetida a uma explosão submarina de uma carga de 5 gramas de TNT, posicionada à distância de 25 mm da referida chapa. Como resultado comparativo, o erro foi de 1,4% em relação ao experimento, comprovando a acurácia do método proposto no presente estudo. A Figura 6 apresenta o resultado obtido de deslocamento ao centro do modelo da chapa (6a) com o resultado obtido experimentalmente (6b).

Após a validação do método utilizado, foi executado o *solver* para a obtenção da resposta da estrutura do catamarã aos três cenários, com cargas submarinas abordadas anteriormente.

## **5. RESULTADOS OBTIDOS**

Os dados obtidos da resposta (máxima em valores absolutos) da estrutura nos pontos selecionados estão apresentados nas Tabelas 1 e 2. Cabe destacar que a variação das cargas explosivas de PETN 1.5 são apresentadas em função do fator de choque (Z), conforme a Equação 1. A profundidade da carga foi considerada invariável (24 metros) e também com ângulo de 90° (carga explosiva posicionada exatamente abaixo do casco).

Nas Tabelas 1 e 2 podemos verificar que, conforme era esperado, com o aumento do peso da carga explosiva adotada, aumenta-se também a amplitude da resposta (e o nível de dano!) da estrutura impactada. Também é possível verificar que os pontos abaixo do convés principal apresentam



Figura 6. (A) Deslocamento do centro da chapa do modelo virtual e (B) deslocamento do modelo real.

	la acima do conves principa		
Z (Kg <sup>1/3</sup> /m) /	0,185 (Kg <sup>1/3</sup> /m) -	0,351 (Kg <sup>1/3</sup> /m) -	0,511 (Kg <sup>1/3</sup> /m) -
Carga Explosiva	88 Kg de PETN 1.5	600 Kg de PETN 1.5	1.850 Kg de PETN 1.5
Deslocamento Total	0,59 x 10 <sup>-4</sup>	0,92 x 10 <sup>-4</sup>	1,4 x 10 <sup>-4</sup>
Máximo (m)			
Velocidade Total Máxima	0,35	0,39	1,0
(m/s)			
Aceleração Total Máxima	2.052,3	5.062	6.778,8
(m/s²)			

Tabela 1. Resposta da estrutura acima do convés principal

#### César Augusto Bernardi Werle

Z (Kg <sup>1/3</sup> /m) /	0,185 (Kg <sup>1/3</sup> /m) -	0,351 (Kg <sup>1/3</sup> /m) -	0,511 (Kg <sup>1/3</sup> /m) -
Carga Explosiva	88 Kg de PETN 1.5	600 Kg de PETN 1.5	1.850 Kg de PETN 1.5
Deslocamento Total	1,0 x 10-4	1,6 x 10-4	2,0 x 10-4
Máximo (m)			
Velocidade Total Máxima	0,2	0,84	1,36
(m/s)			
Aceleração Total Máxima	4.942,5	9.300,0	15.715,0
(m/s²)			

Tabela 2. Resposta da estrutura abaixo do convés principal.

maiores valores de deslocamento, velocidade e de aceleração, conforme apresentado em Reid (1996) e Szturomski (2015). Esses dados são extremamente importantes para a análise do desempenho estrutural ou proporcionarão o adequado dimensionamento dos requisitos dos sistemas vitais do meio naval.

Para a obtenção da resposta da estrutura do catamarã empregado, para o padrão da malha deste trabalho (composta de 320.997 elementos e 86.098 nós), o tempo médio de simulação foi de 11 horas.

## 6. CONCLUSÃO

Ao fim do estudo, pode-se concluir que a simulação computacional moderna pode auxiliar na identificação de pontos vulneráveis de meios navais, possibilitando melhorar a resistência ao choque tanto em meios navais operativos quanto em fase de projeto.

Com este trabalho, fica evidente que, utilizando-se os recursos computacionais disponíveis, pode-se obter, em diferentes cenários, de maneira relativamente rápida e a um custo aceitável, a resposta dinâmica da estrutura naval considerada.

Neste sentido, é possível afirmar que pesquisas científicas empregando essas modernas ferramentas computacionais na área de explosões submarinas acabam contribuindo de forma objetiva para a consolidação da "tríplice hélice" da ciência, tecnologia e inovação (CT&I) autóctone, incrementando sobremaneira a sobrevivência de um meio naval em um cenário de emprego do poder naval da Marinha do Brasil.

### REFERÊNCIAS

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING (ABS). *Guide for building and classing international naval ships.* Texas: Spring, 2022.

BRADBEER, N. I. C. *Implications for underwader shock response of adopting simplified structural styles in warships*. Londres: University College of London, 2013.

BRENNER, M. Navy ship underwater shock prediction and testing capability study. Virgínia: JASON – The MITRE Corporation, 2007.

COLE, R. H. *Underwater explosions*. Princeton: Princeton University Press, 1948.

DIDOSZAK, J. M. *Parametric Studies of DDG-81 Ship Shock Trials Simulations*. Monterey: Naval Postgraduated School, 2004.

KEIL, A. H. *The response of ships to underwater explosions*. Virginia: Structural Mechanics Laboratory Research and Development Report, 1961.

KOK, R. E. Submarine machinery cradle: structural dynamic design and analysis techniques using frequency domain structural synthesys. Monterey: Naval Postgraduated School, 1994. REID, W. D. *The response of surface ships to underwater explosion*. Melbourne: Department of Science and Technology Organization – Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 1996.

SCHNEIDER, N. A.; SHIN, Y. Ship shock trial modeling and simulation of USS Winston S. Churchill (DDG 81). Monterey: Naval Postgraduated School, 2003.

SZTUROMSKI, B. The effect of an underwater explosion on a ship. *Scientific Journal of Polish Naval Academy*, v. 201, n. 2, p. 57-73, 2015. https://doi.org/10.5604/0860889X.1172074

ZHANG, Z. F.; WANG, G.; WANG, L. K.; ZHANG, A. M.; SILBERSCHMIDT, V. V. Underwater explosion of cylindrical charge near plates: Analysis of pressure characteristics and cavitation effects. *Loughborough's Research Repository.* Disponível em https://doi.org/10.1016/j. ijimpeng.2018.06.009. Acesso em: 20 dez. 2022.

WERLE, C. A. B. Obtenção da resposta de uma embarcação virtual sujeita a explosões submarinas. Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2023.

# AVALIAÇÃO DA EVOLUÇÃO DE TENSÕES EM VARETAS DE COMBUSTÍVEL DE LIGA DE ZIRCÔNIO REVESTIDAS COM CROMO E CARBETO DE SILÍCIO VIA ELEMENTOS FINITOS

Finite element analysis of stress evolution of chromium-coated and silicon carbide-coated zircaloy fuel cladding tubes

Artur Santos Paixão<sup>1</sup>

**Resumo:** Revestimento tem sido proposto como método para aumentar a tolerância a acidentes de tubos de combustível feitos de liga de zircônio (*zircaloy*) em reatores de água leve (LWR). Cromo (Cr) e carbeto de silício (SiC) são dois candidatos aplicáveis por sua resistência à oxidação em altas temperaturas. Efeitos de radiação como inchamento e fluência sob irradiação são fatores importantes que podem afetar a estabilidade da interface do revestimento em razão dos diferentes comportamentos dos materiais. Neste estudo, usou-se a análise de elementos finitos para avaliar os níveis de tensão durante a operação normal e o reabastecimento de combustível de um reator a água pressurizada (PWR). Quando resfriadas durante o reabastecimento, as varetas apresentam grandes tensões de tração na interface com o substrato, sinalizando uma condição preponderante para falha do revestimento. **Palavras-chave:** Método dos elementos finitos. Combustível tolerante a acidentes. Revestimento. Evolução de tensões. Abstract: Coating has been proposed as a method to increase accident tolerance of zircaloy fuel rods in light water reactors (LWR). Chromium (Cr) and silicon carbide (SiC) are two applicable candidates due to their high-temperature oxidation resistance. Radiation effects such as void swelling and irradiation creep are the major issues that might impact coating-cladding interface stability due to different materials' behaviors. Here, a finite element analysis is used to evaluate the stress condition during normal operation and refueling of a pressurized water reactor (PWR). The systems appear to have the largest tensile interfacial stress when the coated tubes are cooled down during refueling, creating a leading condition for coating failure.

**Keywords:** Finite element method. Accident-tolerant fuel. Coating. Stress evolution.

Capitão-tenente. Engenheiro Naval. Mestrando em Engenharia Nuclear com ênfase em Materiais pela Universidade Texas A&M, College Station, TX - Estados Unidos.
 E-mail: paixao@tamu.edu

# **1. INTRODUÇÃO**

Os materiais das varetas tradicionais (Zircaloy-2 e Zircaloy-4) para LWR são vulneráveis à oxidação anormal em alta temperatura na presença de vapor, levando a uma grande produção de hidrogênio e aumentado o risco de explosões durante acidentes nucleares. Após o acidente de Fukushima Daiichi, os esforços para desenvolver combustíveis tolerantes a acidentes se intensificaram, originando o conceito chamado de Accident-Tolerant Fuels (ATF) (UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 2024). Uma das propostas de ATF de mais rápida aplicabilidade é o uso de revestimento nas atuais varetas utilizadas. Para esta nova tecnologia, os materiais selecionados devem melhorar a dinâmica oxidação, apresentar confiável estabilidade química e mecânica e não alterar o atual desempenho dos tubos durante operação, como por exemplo ter baixa probabilidade de absorção de nêutrons (YANG et al., 2022). Cromo (Cr) e carbeto de silício (SiC) foram propostos como camadas protetoras para as varetas de combustível (TANG et al., 2017; BRACHET et al., 2019; MANDAL; DABHADE; CHOUGULE, 2021) e avaliados nesses quesitos.

Esforços para avaliar Cr e SiC se concentraram em experimentos de oxidação em temperaturas características de operação normal e acidental de LWR e testes mecânicos de elementos não irradiados. Pouco enfoque se teve sobre o efeito de irradiação de nêutrons nesses materiais quando ligados ao substrato. Cr e SiC incham facilmente sob radiação de nêutrons. Quando ligados a um tubo de Zircaloy, que não incha, ocorre o acúmulo de tensão na interface. A magnitude dessa diferença pode se tornar ainda maior se os coeficientes de expansão térmica dos materiais forem diferentes, dependendo se a expansão volumétrica por inchamento se soma ou cancela à expansão térmica. Outro importante efeito é a fluência sob radiação que tem participação importante no relaxamento de tensões durante a operação dentro do reator. Assim, a fluência reduz a probabilidade de falha do material em razão de diferentes expansões volumétricas durante a operação normal. Por outro lado, ela induz deformações permanentes no material que poderá causar uma condição crítica para o revestimento em termos de estabilidade dimensional, promovendo distorções de forma na interface entre os componentes (GARNER, 2020). Em casos de mudança de cenário operacional com súbito aumento de

temperatura, como por exemplo em acidentes, essas distorções aumentam o risco de delaminação do revestimento. Já para cenários de baixa temperatura, quando o reator é desligado para reabastecimento, todo o relaxamento do gradiente de tensões sob fluência pode reaparecer repentinamente como tensões de sinal oposto, atingindo picos que excedem os limites do material à medida que a temperatura cai para valores mais baixos.

Neste estudo, uma comparação entre a evolução de tensões de interface considerando ambos os materiais (SiC e Cr) é feita usando o software ANSYS por meio do método dos elementos finitos (MEF) para avaliar até então o não estudado efeito das mudanças de dimensões induzidas por radiação na interface entre os materiais de revestimento e o substrato. O modelo MEF concentrou-se exclusivamente nos efeitos de irradiação de primeira ordem, abrangendo o inchamento e a fluência sob irradiação. A distorção por irradiação característica do zircaloy não foi considerada. Outras características não implementadas, como endurecimento e fragilização por irradiação, têm um impacto insignificante na evolução das tensões no revestimento, porém ambas ditarão as consequências da camada protetora, considerando os resultados desta análise. O inchamento é modelado modificando-se o coeficiente de expansão térmica para incluir o seu efeito "atérmico". As tensões associadas à condição operacional de pressão na vareta, ao inchamento e à expansão térmica ativam a fluência. Para vincular ao desempenho real do combustível, a modelagem se aplica a uma vareta de combustível Zircaloy-4 (Zr-4) real usada em um PWR por um período de serviço de dois anos, incluindo o desligamento do reator no final para reabastecimento.

## 2. METODOLOGIA DE MODELAGEM

#### 2.1. INCHAMENTO POR IRRADIAÇÃO

Esta análise inclui o inchamento alterando-se o coeficiente de expansão térmico, induzindo expansão volumétrica isotrópica. *Zircaloy* não incha em condições normais de operação do reator (ADAMSON; GRIFFITHS; PATTERSON, 2017); assim, seu coeficiente permaneceu inalterado. O coeficiente de expansão térmica modificado considera a contribuição do inchamento, conforme apresentado pela Equação 1: Artur Santos Paixão

(1)

$$\alpha_{modified} = \alpha + \frac{S}{3(T - T_{ref})}$$

Sendo:

α: o coeficiente de expansão térmica;
S: o nível de inchamento acumulado;
T: a temperatura de operação;
T<sub>ref</sub>: temperatura de referência de expansão nula.

A mesma formulação para introduzir a expansão do inchamento já foi proposta por Lee e Kazimi (2015).

Essa formulação une de forma eficiente o inchamento por irradiação e a expansão térmica em um único modelo, capaz de introduzir mudanças nas dimensões do material considerando um valor arbitrário de danos por irradiação e aquecimento em altas temperaturas. O fator 1/3 usado no segundo termo traduz o inchamento volumétrico em expansão linear do coeficiente. O termo  $1/(T - T_{ref})$  remove a dependência de temperatura do termo de inchamento, transformando-o em um componente de expansão volumétrico atérmico.

### 2.1.1. Inchamento de cromo por irradiação de íons — Texas A&M

Cr carece de dados de irradiação dentro de reatores, porém, como um método de teste mais rápido e de baixo custo, testes de irradiação por bombardeamento de íons foram realizados na Universidade Texas A&M (TAMU) e dados foram usados como referência. Amostras de Cr puro foram irradiadas com íons de Fe de 5 MeV usando um acelerador tipo *Tandem* de 3 MV na TAMU com um feixe estático não focado. Os testes foram relatados anteriormente em dois estudos separados (RYABIKOVSKAYA *et al.*, 2021; GABRIEL *et al.*, 2022). Os resultados mostram que, acima de 5,9 deslocamentos por átomo (dpa), Cr tem uma taxa de inchamento linear de 0,05% por dpa. Para valores menores de dano, pela falta de dados experimentais, uma taxa constante de 0,14% por dpa foi assumida desde a origem, já que, conforme os estudos, o Cr tem um período de incubação muito pequeno.

# 2.1.2 . Inchaçamento de carbeto de silício de fase tipo $\boldsymbol{\beta}$

SiC de fase tipo  $\beta$  (3C-SiC), caracterizado por uma estrutura cristalográfica cúbica (SNEAD *et al.*, 2007), foi adotado como referência para este estudo por seu comportamento isotrópico. Katoh *et al.* (2014) propuseram uma formulação de inchamento baseada em dados experimentais, conforme a Equação 2 abaixo:

$$\dot{S} = k_s \gamma^{-1/3} e^{\frac{\gamma}{\gamma_{sc}}} \tag{2}$$

Sendo:

S: a taxa de inchamento (por dpa); k<sub>s</sub>: a taxa constante de inchamento;  $\gamma$ : a dose de fluxo rápido (em dpa);  $\gamma_{sc}:$  a dose característica (em dpa) de saturação.

As formulações de regressão para k<sub>s</sub> e  $\gamma_{sc}$  são válidas para a faixa de temperatura entre 473 e 1073 Kelvin (K) (KATOH *et al.*, 2014). A conversão da dose de fluxo rápido (n/m<sup>2</sup>) em dpa foi feita usando a constante 10<sup>25</sup> n/m<sup>2</sup> por dpa, conforme proposto por Katoh *et al.* (2014). A Figura 1 apresenta um gráfico comparativo que mostra o comportamento de inchamento de Cr e SiC.

### 2.2. FLUÊNCIA SOB IRRADIAÇÃO

A fluência sob irradiação redireciona o fluxo de massa anisotropicamente em resposta ao estado de tensão local, sendo incrementada pelo inchamento. Sua formulação tem dois componentes primários, um dos quais é independente do inchaço ( $B_0$ ), denominado *creep compliance*.

O outro é diretamente proporcional à taxa de inchamento, que funciona para manter o estado de tensão induzido em



Figura 1. Evolução da expansão por inchamento de Cr (GABRIEL *et al.*, 2022) e SiC (KATOH *et al.*, 2014) à medida que os danos causados pelos nêutrons aumentam (dose). A rápida redução da taxa de inchamento do SiC faz com que o inchamento sature em  $\approx$  1 dpa. O cromo puro não satura dentro do perfil de danos de um reator a água pressurizada.

baixa magnitude, designada por *stress-enhanced creep*. Esses dois termos representam a taxa de deformação de fluência equivalente em estado estacionário [dpa<sup>-1</sup>], conforme mostrado na Equação 3:

$$\dot{\epsilon}_{creep} = \sigma_{eq} (B_0 + D\dot{S}) \tag{3}$$

em que:

 $\sigma_{eq}$ : a tensão equivalente (GARNER, 2020).

#### 2.2.1. Fluência do cromo

Dados de fluência sob irradiação de Cr puro em ambiente de radiação de nêutrons são nulos. Ainda assim, pode-se tirar proveito de certas caraterísticas universais observadas para outros metais durante a irradiação de nêutrons para desenvolver uma fórmula de fluência razoável. Primeiramente, o coeficiente B<sub>o</sub>parece escalar com a taxa de inchamento em ligas à base de Fe, tanto cúbica de face centrada (CFC) como cúbica de corpo centrado (CCC). Por exemplo,  $B_0 = 1 \times 10^{-6}$  (MPa. dpa)<sup>-1</sup> é um valor consistente para várias experiências realizadas em intervalos de temperatura PWR para aços austeníticos (GARNER, 2020). A taxa de inchamento para o Cr nos estudos de íons da Texas A&M é um fator de 10 inferior às taxas das ligas de ferro cúbicas CCC e um fator de 20 inferior às das ligas de ferro CFC. O coeficiente D parece ser independente do metal ou da estrutura cristalina, pelo menos nas ligas à base de Fe. Por conseguinte, os coeficientes assumidos para a fluência sob irradiação de Cr são sugeridos na Tabela 1.

# 2.2.2. Fluência do carbeto de silício de fase tipo $\beta$

Para o SiC, a fluência sob irradiação apresenta uma taxa transitória para doses baixas, seguida de uma taxa de fluência constante após a saturação do inchamento. Esse comportamento é coberto rescrevendo-se as Equações 2 e 3 com diferentes valores de k<sub>s</sub> e  $\gamma_{sc}$  propostos por Katoh *et al.* (2013) para ajustar-se aos dados experimentais (Equação 4):

$$\dot{\epsilon}_{creep,SiC} = \sigma_{eq} \left[ B_{0,SiC} + D_{SiC} \left( k_s \gamma^{-1/3} e^{\frac{\gamma}{\gamma_{SC}}} \right) \right] \tag{4}$$

Os coeficientes assumidos para a fluência sob irradiação do SiC são sugeridos na Tabela 1.

#### 2.2.3. Zircaloy-4

O Zircaloy-4 tem uma taxa de inchamento insignificante ( $\dot{S} \approx 0$ ), portanto ele possui apenas o termo de *creep compliance*. Uma formulação empírica diferente, mas equivalente, para a taxa de deformação por fluência do Zircaloy-4 é dada pela Equação 5 (ZAHOOR, 2018):

$$\dot{\epsilon}_{creep,Zr4} = C_0 \Phi^{C_1} \sigma_{eq}^{C_2} \tag{5}$$

Em que:

a unidade ε<sub>cr,Zr4</sub>: [s<sup>-1</sup>]; σ<sub>eq</sub>: a tensão equivalente;

 $\Phi$ : o fluxo de nêutrons rápidos (n/m<sup>2</sup>.s).

Constante do Material	Valor Referência				
Stress Relief Anneal (SRA) Zr-4					
C <sub>o</sub>	9,881 × 10 <sup>-28</sup>	(ZAHOOR, 2018)			
C <sub>1</sub>	0,85	(ZAHOOR, 2018)			
C <sub>2</sub>	1	(ZAHOOR, 2018)			
Cromo puro					
B <sub>o</sub>	0,05 × 10 <sup>-6</sup> MPa <sup>-1</sup> dpa <sup>-1</sup>	Section 2.2			
D	0,6 × 10 <sup>-2</sup> MPa <sup>-1</sup>	Section 2.2			
SiC, Chemical vapor deposition (CV	D)				
B <sub>o</sub>	2 × 10 <sup>-6</sup> MPa <sup>-1</sup> dpa <sup>1/3</sup>	(KOYANAGI <i>et al.,</i> 2016)			
Dks	1 × 10 <sup>-7</sup> MPa <sup>-1</sup> dpa <sup>-1</sup>	(KATOH <i>et al.</i> , 2013)			
$\gamma_{sc}$	2 × 10 <sup>-6</sup> MPa <sup>-1</sup> dpa <sup>1/3</sup>	(KATOH <i>et al.</i> , 2013)			

#### Tabela 1. Constantes de fluência sob irradiação para Zircaloy-4, Cr e SiC.

As constantes de material adotadas são apresentadas na Tabela 1. É importante lembrar que a fluência térmica é negligenciável nesta análise, já que a taxa de fluência sob irradiação são ordens de grandeza maiores para temperaturas encontradas na faixa operacional normal em reatores nucleares.

### 2.3. OUTRAS PROPRIEDADES DO MATERIAL

Algumas alterações das propriedades mecânicas do Zircaloy-4 devidas à irradiação foram estudadas de forma consistente, e foram definidas formulações empíricas (GEELHOOD *et al.*, 2021). Uma investigação sistemática sobre as alterações das propriedades do SiC induzidas pela irradiação é apresentada por Snead *et al.* (2007). Por outro lado, os efeitos da radiação de nêutrons nas propriedades do Cr puro são escassos. Por conseguinte, as propriedades termomecânicas do Cr puro foram assumidas como dependentes apenas da temperatura (ARMSTRONG; BROWN, 1964; DUBROVINSKAIA *et al.*, 1997; HOLZWARTH; STAMM, 2002).

### 2.4. MODELAGEM DE ELEMENTOS FINITOS

As tensões na interface do revestimento foram analisadas com base em um modelo linearelástico. Assim, a modelagem não é capaz de capturar nenhuma deformação plástica que venha a ocorrer. Todavia, um modelo elástico é aceitável para esta simulação, pois revestimentos finos são bons exemplos de comportamento de perda de plasticidade em razão de sua resistência significativa ao movimento de discordâncias causado por elevadas densidades de destes defeitos, elevadas concentrações de lacunas em excesso e pequeno tamanho dos grãos (DOERNER; NIX, 1988).

A Figura 2 mostra um desenho esquemático de uma seção da vareta de combustível revestida. A linha tracejada vertical representa o eixo axial central do combustível. Interações mecânicas entre a vareta e o combustível não foram modelados nesta análise. A vareta tem um gradiente de temperatura gerado pelo fluxo de calor (q') vindo do combustível que é retirado pelo sistema de resfriamento na parte externa da vareta, que está a uma temperatura mais baixa ( $T_{BULK}$ ). Esse gradiente é responsável pela formação das tensões térmicas. Além disso, o modelo inclui efeitos da mudança de pressão interna ( $P_i$ ) causados pelo gás



Figura 2. Vista axissimétrica do modelo mostrando as dimensões assumidas, as condições de contorno e o sistema de coordenadas (pastilha de combustível não modelada).

interno (hélio) e o desenvolvimento de produtos da fissão e de alta pressão externa ( $P_e$ ) exercida pelo líquido refrigerante (água). Uma das extremidades do modelo não é restringida, ficando livre para expandir-se. As dimensões assumidas são típicas de varetas de combustível usadas em reatores PWR, além das condições operacionais adotadas, representadas na Tabela 2.

A deformação total  $(\varepsilon_t)$  capturada pelo modelo para dada posição r é composta das contribuições da deformação elástica  $(\varepsilon_e)$  e permanente  $(\varepsilon_p)$ , como descrito pela Equação 6. A deformação elástica é composta das deformações térmica  $(\varepsilon_{th})$  e mecânica  $(\varepsilon_m)$ , como descrito na Equação 7. A deformação permanente é a soma das deformações causadas pelo inchamento  $(\varepsilon_s)$  e fluência sob irradiação  $(\varepsilon_c)$ , conforme descrito pela Equação 8. Estudos anteriores mostraram que tal MEF e soluções analíticas apresentam resultados semelhantes (LEE; KAZIMI, 2015; LEE; LEE; NO, 2017).

$$\epsilon_t(r) = \epsilon_e(r) + \epsilon_p(r) \tag{6}$$

$$\epsilon_e(r) = \epsilon_{th}(r) + \epsilon_m(r) \tag{7}$$

$$\epsilon_p(r) = \epsilon_s(r) + \epsilon_c(r) \tag{8}$$

Esta análise não assume qualquer tensão residual dos processos de deposição. Entretanto, estes valores residuais podem variar em grandes intervalos e ter sinais diferentes (HUFF, 2022). Os impactos de tais processos ainda devem ser avaliados.

# **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Durante as condições iniciais de funcionamento do combustível, tensões de compressão significativas ( $\approx 350$  MPa) no revestimento de Cr são geradas em razão do coeficiente de expansão térmica mais elevado do Cr (pontos iniciais da Figura 3). O SiC, ao contrário do revestimento de Cr, fornece uma condição inicial mais favorável, pois tem o coeficiente de expansão térmica menor que o substrato.

Durante a operação, a fluência sob irradiação é ativada em razão da radiação e da presença do campo de tensões, relaxando-o. No entanto, SiC e Cr se expandem facilmente, aumentando a tensão induzida na interface entre a vareta e o revestimento já no primeiro mês (intervalo de tempo) da simulação. As taxas de fluência e inchamento são os principais fatores que ditam a evolução das tensões. A Figura 3 mostra como a tensão no revestimento evolui para os dois diferentes materiais.

Um aspecto central desta análise é a deformação permanente associada ao relaxamento da tensão produzida pela fluência, representando o dano acumulado durante o tempo de operação. A desvantagem desse relaxamento surge quando a fonte de calor é removida. No momento do reabastecimento (≈ 76,5°C), a fluência sob irradiação não está mais ativa, e qualquer gradiente prévio de tensão induzido reaparece, mas em um sinal inverso, gerando níveis de tração altos



Figura 3. Evolução dos níveis de tensão circunferencial e longitudinal nos revestimentos de cromo e carbeto de silício durante 24 meses de operação em condições normais de operação, com um resfriamento subsequente representando o reabastecimento.

Parâmetro	Valor	Referência
Geração de calor linear (uniforme)	200 W/cm	(WILLIAMSON, 2011)
Fluxo rápido de nêutrons	9,5×10 <sup>17</sup> n/m <sup>2</sup> .s	(WILLIAMSON, 2011)
Taxa de dano (Cromo)*	1,61×10 <sup>-7</sup> dpa/s	(GABRIEL <i>et al.</i> , 2022)
Taxa de dano (SiC)**	9,5×10 <sup>-8</sup> dpa/s	(KATOH <i>et al.</i> , 2014)
Pressão de resfriamento (operacional)	15,5 MPa	(WILLIAMSON, 2011)
Temp. de resfriamento (operacional)	307 °C	-
Coef. de convecção (operacional)	30 kW/m².K	(PIORO; DUFFEY, 2019)
Pressão do resfriamento (reabastecimento)	0,1 MPa	-
Temp. de resfriamento (reabastecimento)	75°C	(ISNAINI; SUBEKTI, 2019)
Coef. de convecção (reabastecimento)	0,5 kW/m².K	(EL-GENK; SU; GUO, 1993)
Gás interno da vareta	Hélio	(WILLIAMSON, 2011)
Pressão inicial do gás interno	2,0 MPa	(WILLIAMSON, 2011)
Pressão operacional do gás interno	4-6,8	(WILLIAMSON, 2011)
Emissividade ( <i>Zircaloy</i> -4)	0,8	(WILLIAMSON, 2011)

Tabela 2. Condições operacionais e de reabastecimento consideradas no método dos elementos finitos.

\*Valores típicos entre [10<sup>-7</sup>, 10<sup>-8</sup>]. Taxa equivalente de 10 dpa em 24 meses; \*\*considerando o fator de conversão de dose para dpa de Katoh *et al*. (2014).

e podendo gerar falhas como a formação de rachaduras transversais ou delaminação de borda (SHUGUROV; PANIN, 2014). Preocupações sobre a perda de integridade de revestimento geradas por esses mecanismos já foram reportadas pela Agência de Energia Nuclear (NEA, 2022).

Nos primeiros meses de operação, as tensões induzidas no revestimento de SiC disparam. A tensão compressiva principal máxima que o revestimento de SiC sofre durante a operação é de ≈ 3,3 GPa, sobrepassando os limites de resistência do material. A resistência à fratura não irradiada para SiC foi relatada entre uma ampla faixa de tensão, de 0,2 a 3 GPa (SNEAD et al., 2007). Apesar de defeitos produzidos pela irradiação endurecerem o material e materiais cerâmicos apresentarem maior resistência a tensões compressivas, a falha do SiC durante a operação é muito provável. Além disso, outras formas de instabilidade de SiC como revestimento para tubos de combustíveis nucleares já foram investigadas, e a camada protetora apresentou grande solubilidade em água durante testes de corrosão em temperaturas de cerca de 350°C (YANG et al., 2022). Associando-se ambas as condições de formação de múltiplas rachaduras e alto nível de dissolução do material, a total perda do revestimento é esperada logo no início da operação do reator.

O oposto é observado para Cr puro. A tensão compressiva no revestimento de Cr começa a diminuir a partir do momento em que a fluência é ativada, mostrando que o período de operação não é uma preocupação em termos de falha do material. Tal tendência é causada principalmente pela baixa taxa de inchamento do Cr, característica dos metais de estrutura cúbica de corpo centrado (CCC). Quando em reabastecimento, os valores de tensão alcançam  $\approx 100-150$ MPa (circunferencial e longitudinal). Limites de tensão para a formação e propagação de trincas em zircaloy revestidos com Cr (não irradiados) em temperatura de operação foram foram reportados na faixa de 600 Mpa (YUAN et al., 2023). Apesar de abaixo dos limites reportados, as tensões no reabastecimento ainda representam um risco de formação de rachaduras por diversos fatores, tais como a redução de ductilidade por irradiação potencial, instabilidade causada pela deformação da fluência, a presença de uma camada intermetálica frágil (YANG et al., 2022), o comportamento frágil do Cr em baixas temperaturas e a possível fragilização dos contornos de grão causados pelo aumento da distribuição de vacâncias. Assim, sempre no período de reabastecimento é necessário realizar inspeções rigorosas para verificar a integridade da camada protetora.

Os modos de falha mais comuns em revestimentos são causados por tensões de tração. As energias de ativação causada por tensões compressivas tendem a ser maiores. Entretanto, a conservação de um estado compressivo na camada protetora de Cr durante a operação pode ainda representar uma condição perigosa no caso de mudança de cenário operacional de normal para acidental, com altas temperaturas, como por exemplo em situações de reactivity-initiated accident (RIA) ou loss-of-coolant accident (LOCA). Pelo fato de o Cr apresentar um coeficiente de expansão térmica maior que a liga de zircônio, grandes gradientes compressivos aparecerão na interface. Ao se adentrar em cenário acidental com uma condição inicial de alto nível de formação permanente, instabilidade geométrica e elevados níveis de tensão compressiva, é possível que haja a formação de pontos fragilizados por alta deformação. Esses pontos poderão servir de atalho para agentes oxidantes alcançarem o substrato, diminuindo assim a função da camada protetora.

# 4. CONCLUSÃO

Foi feita uma análise com o MEF da evolução das tensões em um modelo simples de uma vareta de combustível de um PWR para identificar os momentos de falha de integridade dos revestimentos. As taxas de inchamento e fluência são os fenômenos que ditam essa evolução. O perfil de inchamento para Cr foi adotado de testes de radiação por íons realizados na Universidade Texas A&M, e sua taxa de deformação de fluência foi estimada com base na experiência com ligas de ferro. Dados relativos ao SiC foram encontrados na literatura. O SiC pode apresentar uma instabilidade estrutural e química durante a operação, representando um total comprometimento desse sistema durante operação normal. Isso representa o total comprometimento desse sistema. O Cr é mecanicamente estável durante a operação. Entretanto, o seu comportamento frágil durante o reabastecimento e os valores de tensão na interface têm chances de promover a falha do revestimento por fissuras e trincas. Uma clara definição das consequências não é possível, pois modelos de fratura e limites do Cr em condições de irradiação são desconhecidas.

Os resultados deste estudo visam subsidiar futuras tomadas de decisão relativas à implementação destes materiais como tecnologias para os ATF. A aplicabilidade dos critérios de segurança já existentes para os tubos de *zircaloy*, como por exemplo definidos pela United States Nuclear Regulatory Commission (NRC), deve se manter para a nova configuração revestida (camada protetora é muito fina). Contudo, a perda da integridade do revestimento representa a supressão de uma barreira importante para a segurança nuclear em situações de emergência, além de criar condições perigosas para falha do substrato, entupimento de componentes do sistema de resfriamento do reator, por conta do alto nível de detritos da delaminação, e comprometimento da proteção radiológica da planta nuclear por conta da ativação por nêutrons de isótopos do material. Assim, novos limites de operação definidos por órgãos reguladores, como por exemplo valores máximos de deformação durante a operação normal, devem ser definidos considerando-se o efeito conjunto do inchamento e fluência sob irradiação.

# REFERÊNCIAS

ADAMSON, R.; GRIFFITHS, M.; PATTERSON, C. *Irradiation growth of zirconium alloys, a review.* Tollered: Advanced Nuclear Technology International, 2017. Disponível em: https://www.antinternational.com/docs/samples/FM/04/ZIRAT22-IZNA17\_Irradiation\_Growth\_of\_Zirconium\_Alloys\_Sample.pdf. Acesso em: 18 dez. 2024.

ARMSTRONG, P. E.; BROWN, H. L. Dynamic young's modulus measurements above 1,000°C on some pure polycrystalline metals and commercial graphites. *Transactions of the AIME*, v. 230, 1964. Disponível em: https://www.osti.gov/biblio/4018502. Acesso em: 18 dez. 2024.

BRACHET, J. C. *et al.* Early studies on Cr-coated zircaloy-4 as enhanced accident tolerant nuclear fuel claddings for light water reactors. *Journal of Nuclear Materials*, v. 517, p. 268-285, 2019. https:// doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.02.018

DOERNER, M. F.; NIX, W. D. Stresses and deformation processes in thin films on substrates. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, v. 14, n. 3, p. 225-268, jan. 1988. https://doi. org/10.1080/10408438808243734

DUBROVINSKAIA, N. A. *et al.* Thermal expansion of chromium (Cr) to melting temperature. *Calphad*, v. 21, n. 4, p. 497-508, dez. 1997. https://doi.org/10.1016/S0364-5916(98)00007-8

EL-GENK, M. S.; SU, B.; GUO, Z. Experimental studies of forced, combined and natural convection of water in vertical nine-rod bundles with a square lattice. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 36, n. 9, p. 2359-2374, 1993. https://doi.org/10.1016/S0017-9310(05)80120-6

GABRIEL, A. *et al.* Effect of dpa rate on the temperature regime of void swelling in ion-irradiated pure chromium. *Journal of Nuclear Materials*, v. 561, 153519, 2022. https://doi.org/10.1016/j. jnucmat.2022.153519

GARNER, F. A. Radiation-induced damage in austenitic structural steels used in nuclear reactors. *In*: KONINGS, R. J. M.; STOLLER, R. E. (Org.). *Comprehensive nuclear materials*. 2. ed. Elsevier, 2020. p. 57-168. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.12067-3

GEELHOOD, K. J. *et al. MatLib-1.0: Nuclear Material Properties Library - Developed under NQA-1-2017*: PNNL-31158. Richland: Pacific Northwest National Laboratory, 2021. Disponível em: https://www.nrc. gov/docs/ML2009/ML20099A090.pdf. Acesso em: 18 dez. 2024.

HOLZWARTH, U.; STAMM, H. Mechanical and thermomechanical properties of commercially pure chromium and chromium alloys. *Journal of Nuclear Materials*, v. 300, n. 2-3, p. 161-177, 2002. https://doi. org/10.1016/S0022-3115(01)00745-0

HUFF, M. Review paper: Residual stresses in deposited thinfilm material layers for micro- and nano-systems manufacturing. *Micromachines*, v. 13, n. 12, p. 2084, 2022. https://doi.org/10.3390/ mi13122084

ISNAINI, M. D.; SUBEKTI, M. Heatremoval analysis in the AP1000 reactor's refuelling process. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1198, n. 2, p. 022066, 2019. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1198/2/022066

KATOH, Y. *et al.* Observation and possible mechanism of irradiationinduced creep in ceramics. *Journal of Nuclear Materials*, v. 434, n. 1-3, p. 141-151, 2013. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2012.11.035

KATOH, Y. *et al.* Continuous SiC fiber, CVI SiC matrix composites for nuclear applications: Properties and irradiation effects. *Journal of Nuclear Materials*, v. 448, n. 1-3, p. 448-476, 2014. https://doi. org/10.1016/j.jnucmat.2013.06.040

KOYANAGI, T. *et al.* Neutron-irradiation creep of silicon carbide materials beyond the initial transient. *Journal of Nuclear Materials*, v. 478, p. 97-111, 2016. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2016.06.006

LEE, Y.; KAZIMI, M. S. A structural model for multi-layered ceramic cylinders and its application to silicon carbide cladding of light water reactor fuel. *Journal of Nuclear Materials*, v. 458, p. 87-105, 2015. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.013

LEE, Y.; LEE, J. I.; NO, H. C. Mechanical analysis of surface-coated zircaloy cladding. *Nuclear Engineering and Technology*, v. 49, n. 5, p. 1031-1043, 2017. https://doi.org/10.1016/j.net.2017.03.012

MANDAL, D.; DABHADE, P. A.; CHOUGULE, B. K. Thin film coating of

#### Artur Santos Paixão

silicon carbide on zircaloy-4 tube by FCVD process and a study on its kinetics. *Journal of Nuclear Materials*, v. 552, 152996, 2021. https://doi. org/10.1016/j.jnucmat.2021.152996

NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA). *CSNI Technical Opinion Paper No. 19:* Applicability of nuclear fuel safety criteria to accident-tolerant fuel designs. Paris: OECD Publishing, 2022. https://doi.org/10.1787/ cc408bd9-en

PIORO, I.; DUFFEY, R. Current and future nuclear power reactors and plants. *In*: LETCHER, T. M. (Org.). *Managing global warming:* an interface of technology and human issues. Academic Press, 2019. p. 117-197.

RYABIKOVSKAYA, E. *et al.* Irradiation-induced swelling of pure chromium with 5 MeV Fe ions in the temperature range 450-650°C. *Journal of Nuclear Materials*, v. 543, 152585, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152585

SHUGUROV, A. R.; PANIN, A. V. Mechanisms of stress generation and relaxation. *AIP Conference Proceedings*, v. 1623, p. 575-578, 2014. https://doi.org/10.1063/1.4899010

SNEAD, L. L. *et al.* Handbook of sic properties for fuel performance modeling. *Journal of Nuclear Materials*, v. 371, n. 1-3, p. 329-377, 2007. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2007.05.016

TANG, C. *et al.* Protective coatings on zirconium-based alloys as accident-tolerant fuel (ATF) claddings. *Corrosion Reviews*, v. 35, n. 3, p. 141-165, 2017. https://doi.org/10.1515/corrrev-2017-0010

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Origins of accident tolerant fuel*. United States Nuclear Regulatory Commission, 2024. Disponível em: https://www.nrc.gov/reactors/power/atf/ roadmap/origins.html. Acesso em: 18 jun. 2024.

WILLIAMSON, R. L. Enhancing the abaqus thermomechanics code to simulate multipellet steady and transient lwr fuel rod behavior. *Journal of Nuclear Materials*, v. 415, n. 1, p. 74-83, 2011. https://doi. org/10.1016/j.jnucmat.2011.05.044

YANG, J. *et al.* Review on chromium coated zirconium alloy accident tolerant fuel cladding. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 895, parte 1, 162450, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162450

YUAN, G. *et al.* In situ x-ray computed micro-tomography imaging of failure processes in cr-coated zircaloy nuclear fuel cladding materials. *Materials Design*, v. 234, 112373, 2023. https://doi.org/10.1016/j. matdes.2023.112373

ZAHOOR, M. Modeling primary creep for zircaloy claddings during load reversals and drops in bison. *Journal of Nuclear Materials*, v. 511, p. 212-219, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.09.015 **NUCLEAR E ENERGIA** 

# O SUBMARINO CONVENCIONALMENTE ARMADO COM PROPULSÃO NUCLEAR BRASILEIRO: ANÁLISE E AVALIAÇÃO, 2012 A 2023

The Brazilian conventionally armed, nuclear-powered submarine: Analysis and Evaluation, from 2012 to 2023

Alexandre Rocha Violante<sup>1</sup>

**Resumo:** Esta pesquisa centra-se na análise e avaliação da implementação do projeto Submarino Convencionalmente Armado com Propulsão Nuclear Brasileiro, de 2012 a 2023. Sua contextualização remete aos marcos teóricos provenientes de estudos sobre a defesa nacional e a ciência, tecnologia e inovação como indissociáveis do desenvolvimento sustentável da Nação. A tese que anima a pesquisa é que a construção do submarino nuclear de ataque é vital à soberania marítima brasileira. A metodologia envolveu o método de avaliação de políticas públicas dos professores Vedung e Pedone, empregada na avaliação desta relevante intervenção governamental para a soberania nacional, ciência, tecnologia e inovação e desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Análise e avaliação. Submarino convencionalmente armado com propulsão nuclear. Defesa. Ciência, tecnologia e inovação. Soberania. Desenvolvimento sustentável. Abstract: This study focuses on analyzing and evaluating the implementation of the Brazilian Conventionally Armed, Nuclear-Powered Submarine Project, from 2012 to 2023. Contextualization highlights the theoretical milestones derived from studies on national defense and how science, technology, and innovation are integral to the nation's sustainable development. The thesis that drives the research is that the construction of the nuclear attack submarine is vital to Brazil's maritime sovereignty. The methodology employed the public policy evaluation method of professors Vedung and Pedone to assess the significance of this governmental intervention for national sovereignty, science, technology, and innovation, as well as sustainable development.

Keywords: Analysis and evaluation. Conventionally armed, nuclear-powered submarine. Defense. Science, technology, and innovation. Sovereignty. Sustainable development.

<sup>1.</sup> Capitão de Mar e Guerra (RMI), Doutor e Mestre em Estudos Estratégicos pelo Instituto de Estudos Estratégicos da Universidade Federal Fluminense. Mestre em Ciências Navais pela Escola de Guerra Naval. Professor de Relações Internacionais do Programa de Pós-Graduação em Estudos Marítimos da Escola de Guerra Naval. Professor colaborador da graduação em Relações Internacionais da Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ - Brasil. E-mail: rocha.violante@marinha.mil.br / alexandreviolante@id.uff.br

## **1. INTRODUÇÃO**

O planejamento consiste no ato de ver o presente para pensar o futuro e projetá-lo. Está sujeito ao impacto de múltiplas variáveis de natureza e peso distintos que podem resultar em direcionamentos contraditórios. Nesta pesquisa, um espaço uno, o oceano, mas geopoliticamente dividido, é tratado sob a perspectiva da defesa. Se, por um lado, oceanos e mares remetem à ideia de integração, como malha que interliga sociedades, culturas e economias, seu uso, por outro lado, implica antagonismos ditados por interesses e objetivos que podem opor-se. A defesa requer um pensamento estratégico do Estado: proteger a população e o território, resguardar riquezas, forjar o sentimento de maritimidade, garantir o fluxo comercial. Dispor de meios capazes de dissuadir eventuais ameaças que contrariem os interesses nacionais. Afirmar, em suma, sua soberania.

A defesa, compreendida nesse sentido, requer amplo escopo estratégico. Figueiredo e Monteiro (2016) afirmam que os perigos à segurança marítima, presentes de forma manifesta nas Águas Jurisdicionais Brasileiras (AJB), são, por enquanto, de baixa intensidade, ligados às "novas ameaças". No entanto, não há motivos para crer que continuarão assim, não só pela quantidade de recursos vivos e não vivos que se encontram nesse espaço oceânico. O futuro do planeta é indissociável de uma questão que se impõe: a escassez dos recursos naturais, que são, necessariamente, finitos.

Nesta pesquisa, procura-se responder à seguinte questão: como contribuir para que o mar, seu espaço e recursos não estejam tão suscetíveis à securitização por potências extrarregionais, ou seja, propensos a práticas intersubjetivas em que agentes identificam a existência de ameaças à segurança internacional, concomitantemente a seus interesses.

A tese que se apresenta é que a construção do submarino convencionalmente armado com propulsão nuclear (SCPN) é vital à soberania marítima brasileira ante as atuais e futuras ameaças, por sua principalidade estratégica ligada à ciência, tecnologia e inovação (CT&I) e ao desenvolvimento sustentável. Como objetivos principais, estabeleceram-se a análise e avaliação da implementação do projeto do SCPN, entre 2012 e 2023. Esse espaço temporal delimitou a análise do objeto, sendo o ano de 2012 marcado pela segunda atualização na Política de Defesa Nacional (PDN), agora chamada de Política Nacional de Defesa (PND), além da primeira atualização da Estratégia Nacional de Defesa (END) e o lançamento da primeira Política Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovações (PNCTI). O ano de 2023 deveria assinalar o início efetivo da construção do SCPN, porém essa fase foi postergada para 2025, em razão de *gaps* em sua consecução.

O artigo se estrutura, além desta breve introdução, em mais quatro seções: objetivos, metodologia, resultados, discussão e conclusão.

## **2. OBJETIVOS**

Além do objetivo central apresentado na introdução, como objetivos secundários, buscou-se: apresentar a evolução do projeto SCPN ante cerceamentos internos e externos, verificar sua correlação com a Defesa Nacional a partir da PND e PNCTI e suas respectivas estratégias, além de compreendê-lo não apenas como arma estratégica, mas como um vetor de s*pin off* tecnológico a diversos setores da sociedade, correlacionando-o a espaços de desenvolvimento sustentável.

Por fim, espera-se: reconhecer a necessidade de se inter--relacionarem políticas e programas estratégicos ligados ao mar, à CT&I e à defesa, por meio dos estudos estratégicos. Dessa forma, o SCPN poderá configurar-se em instrumento que contribua para a segurança e defesa da execução e materialização territorial dos objetivos fundamentais do Estado brasileiro.

### **3. METODOLOGIA**

Para alcançar os objetivos propostos, optou-se pelo método de avaliação de políticas públicas e programas estratégicos dos professores Evert Vedung (Universidade de Uppsala, Suécia) e Luiz Pedone (UnB e UFF).

O sentido da palavra avaliação, neste estudo, limita-se à intervenção governamental necessária para a resolução de um problema complexo, por meio do SCPN. Assim, esta avaliação afere a capacidade de a intervenção — que originou o projeto e se encontra em curso — atingir seus objetivos planejados. Busca adquirir, sistematicamente, dados e informações ligados à sua administração, aos *outputs* e aos efeitos dos *outcomes*, de modo a produzir análises de implementação que possam conduzir a ajustes e decisões futuras mais racionais (se necessário) (VEDUNG; PEDONE, 2021).

A primeira ferramenta utilizada nesta fase metodológica de estudo do projeto é a teoria da intervenção (*intervention theory*), que analisa as causas e os problemas que fizeram com que a intervenção pública ocorresse. Busca espelhar as intenções de seus formuladores desde seu início na agenda política, passando pelas discussões dos gestores e operadores, formulação, decisão e implementação, além da avaliação dos resultados alcançados, em qualquer fase da implementação. É uma imagem do momento de como a intervenção eventualmente funcionaria.

A Figura 1 mostra um modelo sistêmico com gestores e operadores e destinatários iniciais, intermediários e finais.

Em uma sequência lógica, os resultados substantivos das intervenções governamentais podem ser avaliados por nove modelos significativos, subdivididos em dois principais: modelos substantivos (eficácia/efetividade) e modelos econômicos (eficiência). Nesta pesquisa, o foco atende à efetividade, inserindo-se nos modelos de alcance de metas (objetivos) (goal--attainment model) e de avaliação de atores interessados (stakeholder model). Esses dois modelos avaliam a implementação do SCPN, independentemente da fase em que o projeto se encontra. A Figura 2 mostra as nove vertentes dos modelos de avaliação (substantivos e econômicos). Aqueles que são utilizados na pesquisa estão sublinhados em vermelho.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A aplicação da teoria da intervenção e dos modelos substantivos escolhidos tem seus resultados e discussão apresentados nesta seção.

## 4.1. TEORIA DA INTERVENÇÃO NO PROJETO SUBMARINO CONVENCIONALMENTE ARMADO COM PROPULSÃO NUCLEAR

A aplicação desta teoria possibilitou analisar os problemas e causas que levaram à intervenção governamental, bem como compreender quais as ações esperadas da política pública em relação à condição que se pretende transformar. No problema







Figura 2. Modelos de avaliação como galhos, ramos e brotos de uma árvore.

proposto: como contribuir para que o mar, seu espaço e recursos não estejam tão suscetíveis à securitização por potências extrarregionais, em médio e longo prazo, em que o projeto SCPN teria grande relevância estratégica.

O desenho de uma política, programa ou projeto se representa em graus sucessivos de agregação de objetivos. A Figura 3 sintetiza a sequência de objetivos do SCPN. Analisando o quadro da intervenção governamental que resultou no SCPN-BR, há:

 Quanto aos objetivos: implantar a infraestrutura para a construção e manutenção de submarinos convencionais e SCPN; e dotar a Marinha do Brasil (MB) de SCPN, a fim de contribuir para a garantia de negação do uso do mar e o controle marítimo das áreas estratégicas de acesso



Figura 3. Teoria da Intervenção do Submarino Convencionalmente Armado com Propulsão Nuclear (SCPN).

ao Brasil, além de permitir a manutenção e o desenvolvimento da capacidade de projetar e construir esses meios navais (BRASIL, 2021). A PND e a PNCTI, como documentos de alto nível, contribuíram para o assessoramento do nível político para a escolha do projeto SCPN;

 Apresentar uma resposta viável aos *input*s exógenos e endógenos, quais sejam: (1) cerceamentos internos e externos ao desenvolvimento nacional pelos países detentores de armas nucleares, signatários do Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares (TNP) e membros permanentes do Conselho de Segurança das Nações Unidas; (2) movimentações do sistema mundo na elaboração de normas restritivas a tecnologias sensíveis; e (3) falta de consciência marítima da população e governos, o que gera um pensamento estratégico dependente das grandes potências.

A partir daí, a intervenção resulta no projeto SCPN propriamente dito, como norteador de uma mudança necessária ao fortalecimento do Poder Naval, contribuindo para o desenvolvimento sustentável, inter-relacionando-se a diversos setores da indústria 4.0 e da economia azul — além do *spin off* e da dualidade tecnológica importantes ao desenvolvimento sustentável.

Como consequência da intervenção, o *output* se refere ao domínio das etapas do projeto e das tecnologias sensíveis, como produto derivado do Programa Nuclear da Marinha (PNM) e do Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB) — o SCPN "Álvaro Alberto".

- Esse *output* decorre da etapa de conversão que acontece no próprio governo, com a assinatura de contratos entre a Diretoria Geral do Material da Marinha (DGMM) e os diversos parceiros comerciais que fazem parte do PROSUB. Os sete contratos<sup>1</sup> comerciais orientam as diretrizes da transferência de tecnologia e a prestação de serviços técnicos especializados, como construção de infraestruturas, transferência de tecnologia e *offsets*, com o objetivo de capacitar a MB a projetar e construir submarinos convencionais e SCPN. Não se engloba a transferência de tecnologia nuclear por parte da França;
- A fase *outcome*, em uma sequência lógica, descreve o que a construção do SCPN representa em valores socioeconômicos, científicos, estratégicos e geopolíticos, pela

dualidade de seu emprego e absorção direta e indireta nas indústrias de base e de transformação;

- Como *outcomes* imediatos: (1) absorção de tecnologia pela capacitação de mão de obra na França; (2) obtenção de infraestrutura básica para a construção do SCPN; (3) além de capacitação de pessoal para a elaboração e implementação do casco do SCPN;
- Os *outcomes* intermediários refletem o desenvolvimento autóctone impulsionado pelos investimentos prioritários ao SCPN nas últimas décadas, na readequação e no cumprimento de contratos em execução e em reuniões com a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), haja vista a tentativa brasileira de adequação de salvaguardas para a construção dessa arma submarina dentro do TNP. O reator e combustível nucleares a serem empregados no SCPN terão baixo nível de enriquecimento de urânio (até 19,9%), valores destinados a atividades para fins pacíficos. Esse é um diferencial brasileiro e único no mundo, comparativamente aos reatores nucleares dos seis países detentores de submarinos nucleares, que atingem níveis de enriquecimento acima de 90% o que possibilitaria a fabricação de armas nucleares (Brasil, DGDTN, 2022);
- Como *outcomes* finais: (1) contribuição efetiva à consecução das tarefas básicas do Poder Naval; *spin off* tecnológico a um desenvolvimento sustentável; (2) maior inserção regional e internacional, com o Brasil sendo o primeiro Estado do Hemisfério Sul com capacidade de projetar e construir um submarino nuclear de ataque; e, por fim, (3) o fomento da mentalidade marítima;
- outcomes indesejados (efeitos colaterais): os efeitos da crise financeira mundial de 2008, sentidos mais assertivamente no país a partir de 2013, combinados com a instabilidade política interna, fizeram com que o Brasil sentisse os contingenciamentos de recursos orçamentários.

Nessas etapas discutidas, pesaram mais cerceamentos internos que externos, haja vista uma elite política e econômica que não tem privilegiado e compreendido a Defesa Nacional, de viés externo, como primordial ao desenvolvimento tecnológico da Nação. O baixo nível de ameaças imediatas, estatais e transnacionais no Atlântico Sul contribui para tal, ligando-se a um pensamento estratégico derivado da geopolítica de blocos de poder hegemônico que defendem, na periferia do sistema, marinhas menos tecnológicas, similares a guardas costeiras.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Oito, se contar com o contrato referente ao início da construção efetiva do casco do SCPN, a partir de dezembro de 2022.

## 4.2. MODELO DE CONSECUÇÃO DE OBJETIVOS (GOAL-ATTAINMENT MODEL)

As respostas aos *gaps* apresentados na subseção anterior ficam mais claras com a apresentação do modelo de consecução de objetivos (*Goal-attainment model*) — que considera os fatores externos intervenientes, abordando as especificidades dos contratos relacionados ao SCPN e a necessidade de alteração de cronogramas de entrega, tanto pelo Brasil quanto pela França.

Governos, desde 2009, têm realizado aportes para a estrutura de consolidação do PROSUB/SCPN. Em que pese a oscilação dos valores executados nos contratos, o projeto tem sido priorizado pela MB em suas articulações com o poder político. No entanto, como dificuldade precípua, há o pouco interesse da sociedade em assuntos de tecnologia e defesa, que pouco difere da conjuntura vivenciada por cientistas como Álvaro Alberto, há mais de 80 anos, por ocasião do início do desenvolvimento nuclear no Brasil.

Os anos de 2014, 2015 e 2016 foram difíceis para o cumprimento das cláusulas de pagamento pela MB. Faltaram recursos para a construção da Base Naval da Itaguaí Construções Navais (ICN) — principal responsável pela construção dos submarinos (a MB detém a ação preferencial *golden share)* —, porém não faltaram verbas para a Unidade de Fabricação de Estruturas Metálicas (UFEM) e SCPN (em fase bem inicial de implementação) (BRASIL, 2022b).

As excelentes relações entre Brasil e França na área militar foram positivas para solucionar esses *gaps*. Ambas as partes propuseram reajustes nos contratos por meio de aditivos, com atualização de prazos, pagamentos e o estabelecimento de cronogramas mais críveis à realidade dos marcos e etapas estratégicas, pelo menos até o ano de 2026. O SCPN possui a colaboração, mesmo que indireta, de todos os contratos do PROSUB em sua consecução, conforme apresentado no Quadro 1, de acordo com as especificações e resultados obtidos/esperados até 2023.

O projeto SCPN, iniciado em 2012, tinha término previsto para 2025. Desde 2022, encontra-se na fase de Projeto Detalhado, feita no Brasil, que integra o projeto de construção e validação da Planta Nuclear Embarcada (PNE) à sua plataforma física (submarino). O início da construção da Seção de Qualificação, que antecede a construção da primeira seção que fará parte do casco resistente, ocorreu em outubro de 2023. A previsão de lançamento ao mar<sup>2</sup> está prevista para 2031 e sua Mostra de Armamento<sup>3</sup> para 2036 (BRASIL, 2022a). O atraso de 11 anos deve-se, além de priorizações orçamentárias, às dificuldades do ineditismo e à magnitude do projeto, desenvolvido, basicamente, por transferência de tecnologia, *know-how* e desenvolvimento autóctone.

A busca por incrementos nas dotações orçamentárias aprovadas nas Leis Orçamentárias Anuais (LOA) tem sido constante, pois as previsões aprovadas nos Planos Plurianuais (PPA) dos quadriênios 2016–2019 e 2020–2023 se mostraram aquém das necessidades previstas (BRASIL, 2019; 2020; 2021). Assim, a MB tem procurado perpassar por essas restrições orçamentárias com algumas emendas parlamentares e realocação de recursos.

Atualmente os maiores *gaps* do Programa Nuclear da Marinha (PNM) e, consequentemente, do SCPN referem--se ao fornecimento de elementos destinados à miniaturização do sistema de controle da planta de propulsão nuclear do Laboratório de Geração de Energia Nucleoelétrica (LABGENE) para sua posterior aposição na respectiva seção de propulsão do SCPN. Suas atualizações refletem a continuidade de pesquisas para a implantação de uma complexa infraestrutura associada ao ciclo do combustível nuclear, o que permitirá a fabricação de elementos combustíveis e a construção dos reatores nucleares para o protótipo em terra e para o SCPN (BRASIL, 2021).

Esses desafios terão de ser suplantados pelo tríplice hélice nacional, o que pode comprometer a independência tecnológica enquanto empresas nacionais não se qualificarem com o *know-how* obtido para inovar — *know-why*. O LABGENE tem previsão de operacionalização em 2025, com validação e comissionamento em 2027. Entre 2027 e 2031, espera-se que toda a tripulação do futuro SCPN já seja treinada nesse laboratório (BRASIL, 2022a).

Importante ressaltar a existência de recursos da ordem de € 1 bilhão para a fabricação de peças, máquinas, equipamentos e sistemas (elétricos, eletrônicos, armas, propulsão etc.) destinados ao Plano de Nacionalização da Produção, importantíssima etapa de transferência de tecnologia que perpassa por todos os

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Cerimônia de prontificação do meio naval pelo estaleiro de construção, com ida ao mar para início de testes e provas operacionais.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> É a cerimônia em que o navio é incorporado ou reincorporado à Esquadra após cumprir teste de aceitação do meio.

# Quadro 1. Contratos do Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB): Consecução de metas e objetivos 2022/2023.

CONTRATOS DO PROSUB	CONSECUÇÃO DE METAS/OBJETIVOS
<b>Contrato 1: 1A e 1B</b> Entrega dos submarinos convencionais brasileiros (S-BR), sistemas, manuais, equipamentos, nacionalização de materiais e transferência de tecnologia	<ul> <li>- A construção de quatro S-BR teve percentual de consecução de metas alcançado de 88,96%, em relação aos 90,05% esperados, após as readequações contratuais.</li> <li>- O contrato 1A trata de etapa de nacionalização relevante aos S-BR e também à construção do casco do SCPN. O processo de nacionalização das atividades industriais dos S-BR iniciou uma curva de declínio, enquanto os desafios para a aquisição e nacionalização de materiais relacionados ao SCPN cresceram.</li> </ul>
<b>Contrato 2: 2A e 2B</b> SCPN e pacote de materiais do sistema logístico e ToT humana	<ul> <li>Como ações concretizadas, iniciaram-se os preparativos para a adequação fabril da NUCLEP e da Unidade de Fabricação de Estruturas Metálicas (UFEM) para a fabricação da Seção de Qualificação e da Seção "C" Preliminar do SCPN (contrato 9 assinado em dez. 2021).</li> <li>O Programa de Nacionalização de Produção encontra-se, agora, na fase de estabelecimento do marco inicial para a definição de novos projetos e atualização dos planos de gerenciamento para a utilização contratual de € 100 milhões.</li> </ul>
<b>Contrato 3</b> Aquisição de torpedos, despistadores, logística e transferência de tecnologia (ToT)	- O torpedo pesado F-21 tem sido executado paralelamente a outros contratos, pela necessidade de integração do programa. Será o principal armamento dos S-BR, podendo compor o SCPN, caso necessário.
<b>Contrato 4</b> Infraestrutura para construção, manutenção e apoio. Aplicação de tecnologia adquirida	- O percentual alcançado foi de 81,69%, comparativamente ao percentual esperado de 88,70%.
<b>Contrato 5</b> Administração dos contratos	- O avanço físico acumulado de 70% corresponde ao cumprimento de 21/30 metas.
<b>Contrato 6</b> ToT propriamente dita	<ul> <li>Envolve processos de compartilhar conhecimentos, experiências e recursos entre organizações ou indivíduos, especialistas e equipes, o que inclui a transferência de propriedade intelectual, <i>designs</i>, especificações técnicas, fabricação etc.</li> <li>Fundamental para impulsionar a inovação, a eficiência na produção e gerar atalhos ao desenvolvimento autóctone.</li> </ul>
<b>Contrato 8</b> Programa de <i>offsets/</i> ToT	<ul> <li>Compensação comercial, industrial e tecnológica ao Brasil pelas importações realizadas com a Naval Group ou suas subcontratadas.</li> <li>Qualitativamente já se percebe a obtenção de know-why na construção de materiais importantes aos S-BR e SCPN.</li> </ul>
<b>Contrato 9</b> Construção da Seção de Qualificação e Seção "C" Preliminar do SCPN	- As atividades iniciaram em fev./2022 e têm previsão de término para nov./2025. Os percentuais físicos da consecução de objetivos/metas foram elaborados com base nas entregas da ICN, sendo alcançados 22,40% e esperados 24,08%.

S-BR: submarino convencional brasileiro; SCPN: submarinos convencionalmente armados com propulsão nuclear; ToT: transferência de tecnologia; NUCLEP: Nuclebrás Equipamentos Pesados SA; ICN: Itaguaí Construções Navais. Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Brasil (2022a).

#### **NUCLEAR E ENERGIA**

contratos, porém mais especificamente pelos contratos 6 (transferência de tecnologia — ToT propriamente dita) e 8 (*offsets*) — este último por envolver, diretamente, empresas estrangeiras e empresas nacionais na construção e manutenção dos submarinos (BRASIL, 2013; BERRIEL, 2021; BRASIL, 2022a).

Já houve a qualificação de empresas para a realização de 54 projetos prioritários, incluindo baterias, motor elétrico principal, motores elétricos, painéis elétricos, compressores de ar, sistemas de combate, tubos de torpedos, rolamentos, sistemas de monitoramento de bateria, válvulas de casco de compressão, bombas de água, entre muitos outros itens (BRASIL, 2022a).

Contudo, esses avanços não têm sido, em seu todo, suficientes para garantir as necessidades previstas para o projeto. A aplicação da transferência de tecnologia na indústria, que resulte em efetividade, é um processo incerto no Brasil. Tal fato decorre da necessidade de garantia de fluxo de demanda para a manutenção dessas empresas, de modo a proporcionar capacidade de inovação no setor privado com a criação de uma Base Industrial de Defesa (BID) associada a universidades e ao Estado como fomentador do desenvolvimento, especialmente em tecnologias sensíveis.

Os fatores extrínsecos do campo interno e externo, discutidos pela Teoria da Intervenção e pelo modelo de consecução de metas, mostraram os *gaps* que foram superados, os que estão em superação e os que podem vir a interferir no projeto. A seguir, apresenta-se o modelo de *stakeholders*, encerrando a análise e avaliação da implementação do SCPN de 2012 a 2023.

### 4.3. MODELO DE AVALIAÇÃO DE ATORES INTERESSADOS (STAKEHOLDERS)

O modelo de avaliação de atores interessados apresenta um mapeamento com os principais atores que estão envolvidos, que podem ser afetados pelo processo de intervenção e influenciam nas tomadas de decisão, implementação e resultados finais do projeto (VEDUNG; PEDONE, 2021).

No nível político, encontram-se os presidentes da República Nacional Francesa e da República Federativa do Brasil, o Comandante da Marinha do Brasil, representando a MB, e Chefes do Estado-Maior da Marinha Nacional Francesa (MNF). No nível diplomático, observa-se a atuação do Ministério das Relações Exteriores e de seu similar na França, dos Ministérios da Defesa de ambos os Estados, da DGDNTM, da Coordenadoria-Geral do Programa de Desenvolvimento de Submarino com Propulsão Nuclear (COGESN), do Centro Experimental ARAMAR pelo Brasil e da Delegação Geral do Armamento (DGA), partícipes do Comitê de Cooperação Conjunto; além da participação de diversos outros ministérios de ambos os parceiros.

No nível comercial e de coordenação, encontra-se a COGESN, subordinada à DGDNTM, e que gerencia todas as atividades do projeto — desenvolvimento, projeto de nacionalização, construção e contratos com a *Naval Group*. O Consórcio Baía de Sepetiba (CBS) — responsável por coordenar o conhecimento adquirido por todo o trabalho realizado pelas empresas ligadas ao SCPN — e o Consórcio Norberto Odebrech S.A (CNO) formaram uma Sociedade de Propósito Específico (SPE) a Itaguaí Construções Navais (ICN) —, principal responsável pela construção dos submarinos (BRASIL, 2022b).

No complexo CT&I, por parte da sociedade, há a participação de universidades como a Universidade de São Paulo (USP) e Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), que prestam cursos de capacitação em vários setores, bem como da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), atuando de forma ativa no licenciamento da área nuclear. Ainda na academia, o Programa de Cooperação Acadêmica em Defesa Nacional (PROCAD), liderado pela Universidade Federal Fluminense (UFF) e com participação da Escola de Guerra Naval (EGN), constitui ação governamental destinada a fomentar a cooperação entre instituições civis e militares para a implementação de projetos voltados para a formação de recursos humanos e a produção de pesquisas científicas e tecnológicas na área da defesa, que é o caso de estudo do SCPN, principalmente na questão de salvaguardas nucleares que podem causar "novos" cerceamentos de atores externos que impossibilitem a conclusão do projeto, mesmo o Brasil tendo cumprido todas as formalidades e exigências da AIEA. A adesão ao protocolo adicional ao TNP, sem maiores contrapartidas e entendimentos, pode afetar o desenvolvimento do sistema de propulsão do SCPN, com a revelação de segredos industriais. A justificativa hegemônica utilizada para a adesão é que essas ferramentas previnem a proliferação das armas nucleares, o que cessaria a possibilidade de conflitos atômicos. Na prática, o que tem aumentado é a desproporcionalidade de defesa e tecnologia entre o centro e a periferia, com os Estados nucleares monopolizando a superioridade de hard power militar.

Os *stakeholders* supracitados foram e são importantes à consecução do projeto SCPN. No entanto, muitos outros da elite política, econômica e intelectual nacional praticamente desprezam o binômio defesa-desenvolvimento, pois

#### **NUCLEAR E ENERGIA**

o baixo nível de ameaças imediatas, estatais e transnacionais no Atlântico Sul contribui para um pensamento estratégico de curtíssimo prazo que se subordina a políticas de defesa de Estados hegemônicos que advogam a existência de marinhas menos tecnológicas na periferia do sistema mundo.

## **5. CONCLUSÃO**

O mundo atual é cenário da compressão espaço-tempo, em que a informação é transmitida aos locais escolhidos no momento desejado. As significativas perspectivas de progresso tecnológico apresentam cenários de incerteza. Assim, os recursos passam a valer mais de acordo com o local a que pertencem, sendo qualificados geograficamente. E o mar é um desses espaços de cobiça, de desenvolvimento, como última fronteira a ser explorada econômica e estrategicamente.

A construção do SCPN por tecnologia autóctone é um excelente exemplo da redução de vulnerabilidades estratégicas e do fomento de um pensamento estratégico nacional capaz de superar as amarras do desenvolvimento estrutural. Sua dimensão perpassa por sua construção propriamente dita. A capacitação nacional, a *expertise* adquirida por uma Base Industrial de Defesa (em construção), a dualidade que envolve diversos setores industriais e a aquisição de *hard power* militar-naval restrito a somente seis países insere o Brasil em outra dimensão na política internacional. Os principais *gaps* internos percebidos na avaliação da implementação do SCPN decorrem da baixa integração entre políticas públicas e suas estratégias correlatas, fruto de interrupções de etapas de construção, readequações contratuais, postergação de prazos por falta de priorização do poder político e da sociedade. Quanto aos cerceamentos externos, estes são comuns por se tratar de uma tecnologia sensível e fundamental, libertadora de técnicas hegemonizadas, mesmo em processos voltados para uso pacífico.

Por possuir um programa dessa natureza, o Brasil se insere em condições únicas na política internacional, principalmente por desenvolvê-lo sem qualquer apadrinhamento das potências nucleares signatárias do TNP. Ressalta-se que a cooperação com a França não se dá nuclearmente.

Ao final, comprovou-se a tese proposta de que a construção do SCPN é vital soberania marítima brasileira ante as atuais e futuras ameaças, por sua principalidade estratégica ligada à CT&I. De fato, quanto mais lento o avanço tecnológico, menor o desenvolvimento, o que compromete a consecução das tarefas básicas do Poder Naval na Amazônia Azul.

Como trabalho futuro, sugere-se a realização de análises e avaliações de programas estratégicos como este, que importam à compreensão de como o desenvolvimento tecnológico próprio contribui, de forma racional e sustentável, para incrementar todos os campos do Poder Nacional. Almeja-se, com isso, reduzir os diversos *gaps* tecnológicos entre o Brasil e os principais atores internacionais.

# REFERÊNCIAS

BERRIEL, G. *Metodologia de avaliação de processos de transferência de tecnologia:* os casos do PROSUB, Guarani e H-XBR. São Paulo: Dialética, 2021.

BRASIL. Tribunal de Contas da União. *Auditoria operacional na transferência de tecnologia do Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB)*. Brasil: Tribunal de Contas da União, 2013.

BRASIL. Relatórios de gestão anuais da MB. Brasil: Marinha do Brasil, 2019.

BRASIL. *Relatórios de gestão anuais da MB*. Brasil: Marinha do Brasil, 2020.

BRASIL. Relatórios de gestão anuais da MB. Brasil: Marinha do Brasil, 2021.

BRASIL. Coordenadoria-Geral do Programa de Desenvolvimento de Submarino com Propulsão Nuclear (COGESN). *Respostas a pedido de informações*. Brasil: COGESN, 2022a.

BRASIL. Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha (DGDNTM). *Conversas com o Encarregado do PROSUB*. Brasil: DGDNTM, 2022b.

FIGUEIREDO, E. L.; MONTEIRO, A. A. D. O papel do Brasil na segurança marítima no Atlântico Sul. *Revista da Escola de Guerra Naval*, v. 21, n. 2, p. 25-62, 2016.

VEDUNG, E.; PEDONE, L. Avaliação de política públicas e programas governamentais: fundamentos e modelos. Rio de Janeiro: Luzes, 2021.

133

# PARTIDA DE UM PEQUENO REATOR MODULAR APÓS DESLIGAMENTO ACIDENTAL: UMA INVESTIGAÇÃO PARA SUBSIDIAR A OPERAÇÃO E O PROJETO DE REATORES DE PROPULSÃO

Restarting of a small modular reactor after unplanned shutdown: A research to help in the operation and design of propulsion reactors

#### Rafael Castro Monteiro<sup>1</sup>, Rubens Seishi Wassano<sup>2</sup>

Resumo: Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de investigar as dificuldades para o religamento de uma pequena planta nuclear após um desligamento não planejado de seu reator (SCRAM, ou trip). Para isso, foi utilizado o simulador de um Pequeno Reator Modular (PRM), desenvolvido pela empresa TECNATOM e disponibilizado pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), o iPWR-SMR. Durante este estudo, foram analisados os parâmetros desse reator após o desligamento e ao longo de seus religamentos. Os períodos de desligamento escolhidos foram baseados na evolução do xenônio pós-trip e nas necessidades operacionais de uma embarcação movida a energia nuclear. Os resultados, que apresentam variações de até 95% nos tempos de religamento, visam trazer subsídios aplicáveis ao treinamento de operadores de reatores de propulsão e aos projetos desse tipo de navio e seus respectivos Protótipos de Terra. As observações relacionadas ao design se referem principalmente aos métodos de controle de potência do reator, ao dimensionamento da fonte alternativa de energia da embarcação e ao excesso de reatividade. Palavras-chave: Pequeno reator modular. Partida pós-trip. Xenônio. Abstract: This work aimed to analyze the difficulties found during the restart of a small nuclear plant after an unplanned reactor shutdown (SCRAM, or trip). For this purpose, a small modular reactor (SMR) simulator, developed by TECNATOM and distributed by the International Atomic Energy Agency (IAEA), known as iPWR-SMR, was used. During this study, the reactor's parameters were analyzed both after a SCRAM and during the restart process. The chosen shutdown periods were based on the evolution of xenon concentrations following the trip and the operational requirements of a nuclear-powered vessel. The results, which demonstrate variations of up to 95% in restart times, are intended to inform the training of propulsion reactor operators and the design of such vessels and their corresponding Ground Prototypes. The design considerations primarily focus on reactor power control methods, the sizing of the vessel's alternative energy source, and the management of excess reactivity.

Keywords: Small modular reactor. Reactor restarting. Xenon.

 Capitão de Corveta. Mestre em Engenharia de Plantas Nucleares de Potência pela KEPCO Nuclear Graduate School (Coreia do Sul). Chefe do Departamento de Treinamento e Requalificação do Centro de Instrução e Adestramento Nuclear de Aramar, Sorocaba, SP -Brasil. E-mail: monteiro.rafael@marinha.mil.br
 Capitão de Corveta. Engenheiro eletrônico, operador sênior do reator IPEN/MB-01. Assessor técnico do Superintendente de Instrução Nuclear do Centro Industrial Nuclear de Aramar, Sorocaba, SP - Brasil. E-mail: rubens.wassano@marinha.mil.br

# **1. INTRODUÇÃO**

Atualmente, a área nuclear enfrenta potenciais mudanças. As Plantas Nucleares de Potência (PNP), que por muitas décadas foram soberanas, agora dividem a atenção com os Pequenos Reatores Modulares (PRM). Essas plantas destacam-se pela economia na instalação e pela versatilidade operacional, o que tem levado à multiplicação de projetos desse tipo ao redor do mundo. Em meio a isso, a Marinha do Brasil (MB) vem concentrando esforços no desenvolvimento de um pequeno reator, que poderá ser de uso dual. Essa instalação, que servirá como Protótipo de Terra para testes e treinamentos relacionados à propulsão de um navio movido a energia nuclear, também tem o potencial de se tornar uma planta precursora de um PRM brasileiro. Assim, o projeto da Marinha não se limitará apenas à área de defesa, mas também contribuirá para a segurança energética do país (SANTOS GUIMARÃES, 2024).

Apesar da credibilidade das PNP, desligamentos não planejados ocorrem com frequência considerável em plantas nucleares comerciais, acarretando impactos financeiros significativos. Em usinas modernas, como é o caso das plantas sul-coreanas modelo APR1400, o tempo médio para o religamento e elevação de potência após um SCRAM acidental pode ultrapassar 120 horas (CASTRO MONTEIRO; CHANG JOO, 2021). Esse longo intervalo de tempo tem como uma de suas razões principais o aumento da concentração de xenônio-135 (Xe), que insere reatividade negativa<sup>1</sup> após o desligamento, conforme detalha o item 3.2. No caso de navios movidos a energia nuclear, contudo, tempos tão longos para o restabelecimento da propulsão não são uma opção, pois podem comprometer manobras e representar riscos a seus tripulantes. Por isso, faz-se necessário conhecer os detalhes do comportamento do xenônio em reatores de propulsão, principalmente nas condições de religamento da planta.

### **2. OBJETIVOS**

O objetivo inicial deste trabalho é obter e comparar os tempos necessários para reiniciar a operação de um PRM após um SCRAM inadvertido, quando a planta operava a 100% de potência. Os religamentos considerados ocorreram após diferentes intervalos pós-*trip*, consequentemente resultando em diferentes condições de Xenônio. De posse dessas informações, o propósito passa a ser analisar as possíveis consequências para a operação de um reator nuclear usado em propulsão, principalmente sob situações adversas. Essa análise visa gerar reflexões que contribuam para o aprimoramento do treinamento de operadores e para a melhoria dos projetos de navios movidos a energia nuclear, incluindo seus protótipos terrestres.

## 3. FERRAMENTAS E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Visando conhecer melhor o comportamento do xenônio após um desligamento acidental em uma planta de menores proporções, este estudo buscou essas informações a partir de simulações computacionais. Como os dados da planta em desenvolvimento pela MB devem ser preservados e levando-se em consideração que a instalação da MB se assemelha muito mais a um PRM do que a uma PNP, em termos de potência, o iPWR-SMR surgiu como uma opção coerente e oportuna para este estudo. As características desse simulador são apresentadas a seguir.

#### 3.1. IPWR-SMR

O programa desenvolvido pela TECNATOM simula um PRM do tipo água pressurizada(*pressurized water reactor* – PWR), com 150 MW de potência térmica e 45 MW de potência elétrica. Essa planta possui: um circuito primário, onde a água pressurizada é aquecida dentro do vaso do reator e troca calor com a água do circuito secundário no gerador de vapor, sem contato entre elas; um circuito secundário, onde o vapor gerado pelo aquecimento da água desse circuito atua no turbogerador, volta ao estado líquido no condensador e dali retorna ao gerador de vapor por meio de bombas de alimentação; e um circuito terciário, onde um líquido refrigerante troca calor com a mistura água-vapor que entra no condensador. O controle de reatividade (potência) nesse

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> "Reatividade", com unidade normalmente em pcm (por cem mil), mede se o processo de fissão do combustível está com reação em cadeia autossustentada ou não. É dito que algo insere "reatividade negativa" quando atrapalha o processo de fissão, normalmente por absorver nêutrons, impedindo-os de fissionar o combustível.

reator pode ser feito de duas formas: movimentando-se barras absorvedoras de nêutrons, ou promovendo variações na concentração de boro no refrigerante.

Na partida ou religamento dessa planta, tanto a movimentação das barras absorvedoras quanto a variação da concentração de boro são utilizadas para alterar a reatividade, elevando a potência do reator. A operação prossegue assim, conduzida pelo circuito primário até que seja atingido o mínimo necessário para iniciar a turbina a vazio. Após o sincronismo do turbogerador com a rede e antes do início da subida de potência do gerador elétrico, esse controle passa para o secundário da planta, que demanda mais ou menos vapor por meio da válvula de admissão do turbogerador.

O iPWR-SMR conta com diversas telas, destacando-se as de controle da turbina, de controle das barras e do núcleo. Nessa última, conforme ilustrado na Figura 1, são apresentados dados importantes, como: fluxo neutrônico, temperaturas no combustível e o balanço de reatividade, com os valores relativos ao boro e ao xenônio. Nessa tela, também é possível comandar a boração ou diluição do refrigerante no núcleo.

O simulador do iPWR-SMR conta com várias condições iniciais, possibilitando iniciar a simulação em diversos cenários de potência e queima do combustível.

#### 3.2. COMPORTAMENTO DO XENÔNIO

Considerando um reator limpo na partida, ou seja, livre de "venenos produtos de fissão"<sup>2</sup>, é possível observar que a concentração de xenônio cresce de forma gradativa, até alcançar um patamar definitivo algum tempo após o reator atingir 100% de sua potência; tal concentração é obtida pela Equação 1 (IAEA, 2017).

$$\frac{\delta Xe}{\delta t} = \gamma_{Xe} R_{FISS} + \lambda_I I - \lambda_{Xe} Xe - A_{Xe} Xe \tag{1}$$

Onde:

I / Xe: Concentração de Iodo / Xenônio;  $\gamma_{Xe}$ : Fator de produção de Xe<sup>135</sup> devido à fissão;  $R_{FISS}$ : Taxa de fissão;  $\lambda_{I} / \lambda_{Xe}$ : Constante de decaimento I<sup>135</sup> / Xe<sup>135</sup>;  $A_{Xe}$ : Taxa de absorção de nêutrons do Xe<sup>135</sup>.

Como demonstrado na Equação 1, a variação do xenônio no núcleo do reator depende de sua produção, tanto diretamente, por meio de fissões do urânio-235, quanto indiretamente, por decaimento do iodo<sup>3</sup>; e de seu desaparecimento, por meio da absorção de nêutrons pelo xenônio e pelo seu decaimento<sup>4</sup>.



Figura 1. Tela do Núcleo do iPWR-SMR.

No iPWR-SMR, quando o reator permanece em sua potência máxima por longo tempo, o valor da reatividade ( $\rho$ ) negativa de xenônio estabiliza-se próximo a -2.430 pcm. Ao ser simulado um SCRAM do reator nessa condição, a variação de reatividade causada pela concentração de xenônio, desde o momento do *trip* até que a concentração do referido produto de fissão se aproxime de zero, é mostrada na Figura 2.

Logo após o SCRAM, o fluxo neutrônico diminui bruscamente, levando a praticamente zero a produção direta de xenônio por fissões e o seu desaparecimento por meio da absorção de nêutrons. Devido à meia-vida do iodo ser mais curta que a do xenônio, inicialmente o fator preponderante na Equação 1 será a produção de xenônio por decaimento de iodo, o que faz a população de xenônio aumentar até atingir seu pico, inserindo uma reatividade negativa máxima ( $\rho_p$ ) de -3.330 pcm, conforme mostrado na Figura 2.

Se o reator permanecer desligado por um período superior a 7,16 horas ( $T_p$ , tempo de pico de Xe pós-*trip*), a maior parte do iodo já terá decaído, e o fator de destaque passa a ser o decaimento do xenônio, o que faz a população desse elemento diminuir. Essa condição perdura por aproximadamente 72 horas após o desligamento, quando a concentração de xenônio se aproxima de zero.





<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> "Produtos de fissão" são os elementos produzidos quando o combustível é fissionado. Alguns desses produtos, notadamente o Xe-135, inserem muita reatividade negativa, e por isso são chamados de "venenos", uma vez que "envenenam" o processo de fissão.

## 4. METODOLOGIA

Baseado na Figura 2 e considerando as particularidades operativas de uma embarcação, especificamente a necessidade premente do restabelecimento da propulsão após um *trip* inadvertido dessa planta, foram adotados, como parâmetros do trabalho, intervalos denominados "Tempos de Desligamento". Esses tempos correspondem aos períodos entre o SCRAM e o início do religamento da planta. A partir desse ponto, esses intervalos serão chamados simplesmente de "T<sub>D</sub>", sendo os valores escolhidos para essa variável, nas simulações, os seguintes:

- T<sub>D</sub> = 0,5 hora (Caso I). Esse tempo representa a ocorrência do *trip* por um sinal espúrio da instrumentação, erro de operação conhecido, ou avaria de solução muito simples. Nesse caso, há apenas uma pequena elevação da população de xenônio no núcleo;
- T<sub>D</sub> = 3 horas (Caso II). Esse caso se refere a uma avaria simples, mas que necessita ser investigada, ou mesmo um erro na execução de um procedimento que ocasionou o *trip* do reator e não foi percebido de imediato pelos operadores. Nesse caso a concentração de xenônio já se torna significativa;
- T<sub>D</sub> = 7 horas (Caso III). Nesse cenário a população de xenônio está muito próxima do seu pico pós-*trip* (T<sub>p</sub>=7,16h), conforme mostrado na Figura 2. Essa simulação representa uma situação em que a propulsão precisa ser restabelecida, mesmo que fora das condições ideais;
- $T_D = 10$  horas (Caso IV). Apesar de já ultrapassado o pico de xenônio pós-*trip*, a concentração desse veneno produto de fissão continua alta, dificultando o religamento. Nessa situação, deve ser considerada a possível falha dos sistemas alternativos de fornecimento de energia para os sistemas vitais de bordo. Dessa maneira, o religamento deve acontecer para evitar que navio fica à deriva e totalmente sem energia, o que representaria riscos materiais e pessoais.

Uma vez definidos os tempos de desligamento, o próximo passo é executar os religamentos para cada  $T_D$ . Para efeito de cômputo do tempo de religamento, o processo de partida do reator após o desligamento não programado será dividido em três etapas, a saber:

 Etapa 1: A que mais demanda do operador do reator: reconhecimento e rearme de alarmes e equipamentos após o *trip*, criticalização do reator e elevação da potência térmica até 15% da nominal, utilizando barras de controle e variação de boro, com a planta ainda sem geração de energia elétrica;

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> O I-135, por sua vez, também é um produto de fissão, porém não é um veneno. No entanto, esse isótopo é inerentemente instável, transformando-se lentamente em Xe-135, num processo denominado decaimento.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> O Xe-135, ao absorver um nêutron, deixa de ser um veneno. Além disso, mesmo sem absorver nêutrons, ainda sofre decaimento, transformando-se em outro elemento e deixando de ser um veneno.

- Etapa 2: Enquanto a potência térmica do reator permanece em torno de 15%, no circuito secundário ocorre o recebimento de vapor pela válvula de admissão da turbina, com rolagem do rotor e posterior assunção de carga do conjunto turbogerador, em baixos níveis. No final desta etapa, a potência elétrica é elevada e estabilizada em um valor próximo a 5%;
- Etapa 3: Com praticamente todos os controles em automático, elevação da potência da planta (térmica e elétrica) até 100% da potência nominal, com as barras de controle totalmente retiradas, sendo realizados os ajustes finais do controle de reatividade por meio da variação de boro no refrigerante.

Para facilitar o entendimento, os tempos de religamento obtidos nas simulações serão representados por " $T_R$ " e serão a soma dos tempos nas etapas 1, 2 e 3, representados respectivamente por:  $T_{E1}$ ,  $T_{E2}$  e  $T_{E3}$ . A Equação 2, a seguir, mostra o cálculo de  $T_R$ .

$$T_{R} = T_{E1} + T_{E2} + T_{E3}$$
(2)

Há ainda a variável tempo total  $(T_T)$ , que representa o período entre o momento do desligamento e aquele em que a potência elétrica da planta retorna ao seu valor máximo nominal. A Equação 3, na sequência, mostra o cálculo de  $T_T$ 

$$T_{T} = T_{D} + T_{R} \text{ ou } T_{T} = T_{D} + T_{E1} + T_{E2} + T_{E3}$$
 (3)

Visando facilitar a compreensão da metodologia apresentada, foi plotado na Figura 3 o gráfico com os dados de uma das simulações feitas para o Caso I ( $T_D = 0,5h$ ). Nele é possível observar como a potência térmica da planta e a reatividade do xenônio variam ao longo do tempo.

Para essa e todas as outras simulações, foram utilizados os mesmos procedimentos contidos no manual do iPWR-SMR. Assim, os religamentos foram iniciados com a remoção total das barras absorvedoras dos bancos A e B e com a retirada de 49 dos 80 passos possíveis para o banco C. Após isso, o reator foi criticalizado, por meio da diluição de boro e, na sequência, o banco C foi utilizado para elevação da potência até seu valor máximo, conforme recomenda o manual de operação da planta. Depois desse banco estar totalmente retirado, pequenos ajustes foram feitos novamente com a variação de boro. Cabe ressaltar que o projeto desse reator exige o uso de boro, provavelmente para uniformizar a distribuição de potência e a queima de combustível, de modo a estender a vida útil do núcleo e reduzir custos.

Os quatro casos descritos, a partir dos diferentes  $T_{D_i}$  foram realizados considerando o reator no Começo de Vida do Núcleo (*beginning of core life* – BOL). Para efeito de comparação, o Caso III, que representa a condição mais desfavorável de xenônio, foi repetido nas outras idades do núcleo disponíveis no simulador: Meio de Vida (*middle of life* – MOL), e Fim de Vida (*end of life* – EOL).

#### **5. RESULTADOS**

Os tempos de religamento obtidos nas simulações de cada caso (casos I, II, III e IV) no BOL são mostrados na Tabela 1. A referida tabela, além de mostrar o  $T_R$  por etapa ( $T_{E1}, T_{E2} e T_{E3}$ ),



Figura 3. Exemplo de Simulação de Religamento para o Caso I ( $T_p$  = 0,5 h).

Tabe	la	1. 1	Tempos c	le rel	igament	to, re	ativid	lades	de	Xe e	e var	iação	o na	concen	tração	o de	e boro	, no	BC	)L.
------	----	------	----------	--------	---------	--------	--------	-------	----	------	-------	-------	------	--------	--------	------	--------	------	----	-----

Caso	T <sub>D</sub> (h)	ρ <sub>xe</sub> (pcm)	T <sub>E1</sub> (h)	T <sub>E2</sub> (h)	T <sub>E3</sub> (h)	T <sub>R</sub> (h)	T <sub>T</sub> (h)	∆C <sub>в</sub> (ppm)
T	0,5	-2.530,50	0,4	0,29	0,81	1,50	2,00	80
П	3	-3.064,50	0,59	0,30	0,83	1,71	4,71	249
III	7	-3.326,50	0,78	0,34	0,84	1,95	8,95	356
IV	10	-3.229,00	0,65	0,32	0,83	1,8	11,8	318
também apresenta a reatividade negativa inserida pelo xenônio no final de cada  $T_D$ , ou seja, no início do religamento da planta, bem como registra a variação na concentração de boro necessária para alcançar novamente a criticalidade. A reatividade do xenônio e os tempos relativos ao Caso I, podem igualmente ser visualizados na Figura 3, auxiliando uma melhor compreensão da Tabela 1.

Conforme demonstram os dados apresentados na Tabela 1 e na Figura 2, a reatividade devido à população de xenônio torna-se mais significativa conforme o  $T_D$  se aproxima de 7,16 horas. Assim, os  $T_R$  e a variação na concentração de boro ( $\Delta C_B$ ) crescem do Caso I ao Caso III e depois diminuem para o Caso IV. Também é possível notar, com auxílio da Tabela 1, que os  $T_{E2}$  e  $T_{E3}$  pouco mudam para diferentes  $T_D$ . Contudo, há um aumento significativo de  $T_{E1}$  conforme o tempo de desligamento se aproxima do  $T_P$ . Dessa forma, na comparação entre os Casos I e III, os valores de  $T_{E1}$  são, respectivamente, 0,4 h e 0,78 h, o que representa uma diferença de 95% para esses casos. A Etapa 1 também se destaca por ser a que mais exige atenção do operador e atuações em modo manual.

É importante esclarecer que os religamentos ocorreram com os parâmetros de segurança sempre muito próximos dos seus limites, com taxas de subida de potência agressivas e com tempos mínimos de espera para a estabilização das variáveis. Assim, ao final da Etapa 3, a situação do reator era sempre a seguinte: reator crítico a 100%, com suas barras absorvedoras totalmente retiradas e com necessidade constante de variação da concentração de boro para compensar as oscilações do xenônio, que seguia instável. Ainda sobre o boro, a última coluna da Tabela 1 mostra como ocorreram as variações na concentração desse absorvedor de nêutrons durante o religamento, mais especificamente na criticalização do reator na Etapa 1. Não por coincidência, a maior variação na concentração de boro acontece no Caso III, onde ocorre uma significativa diluição para compensar a reatividade negativa inserida pelo xenônio e tornar o reator crítico. Conforme demonstrado em diversos estudos, essa variação na concentração de boro é um processo lento, quando comparado à retirada de barras absorvedoras (ABDELHAMEED; REHMAN; KIM, 2017; CASTRO MONTEIRO; CHANG JOO, 2021).

O "excesso de reatividade" refere-se à reatividade positiva disponível, que pode ser inserida para compensar eventuais distúrbios. No iPWR-SMR, essa inserção é realizada principalmente pela diluição do boro. No MOL, a concentração de boro no reator antes do desligamento era de 390 ppm, um pouco maior que a metade da concentração no BOL. Os resultados do Caso III no MOL, contudo, são muito parecidos com os obtidos no BOL, com  $T_R e \Delta C_B$  praticamente idênticos. No entanto, no EOL, a concentração inicial de boro, de apenas 10 ppm, não foi suficiente para possibilitar uma diluição  $(\Delta C_B)$  de 356 ppm. Em outras palavras, o excesso de reatividade no EOL é tão pouco que não foi possível religar a planta em tempo hábil. Por esse motivo, o  $T_T$  mínimo no Caso III passou a ser por volta de 20 horas, tempo necessário após o *trip* para que a reatividade do Xe retornasse para o valor de equilíbrio, observado imediatamente antes do desligamento (Figura 2).

## 6. CONCLUSÕES

Não restam dúvidas de que, visando unicamente a segurança do reator, a forma ideal de religar uma planta nuclear após um SCRAM acidental seria aguardar até a estabilização de todos os seus parâmetros, o que leva cerca de 72 horas, conforme indicado neste trabalho. Embora essa abordagem seja viável em plantas comerciais, tal intervalo tende a ser inaceitável para um meio marítimo, sendo necessário estudar a viabilidade de soluções alternativas.

Observando os  $T_R$  obtidos nas simulações efetuadas, verifica-se que crescem conforme o período de desligamento se aproxima de 7 horas. Diante do exposto, é nítido que uma tripulação bem adestrada para reagir a um *trip* e realizar um rápido religamento reduz tanto o tempo de início da resposta ( $T_D$ ) quanto o tempo total para o restabelecimento da planta ( $T_T$ ). Além disso, estudos demonstram que a utilização exclusiva de barras de controle para variação de reatividade tornaria o religamento mais rápido e menos desgastante para os operadores.

A respeito do Caso IV, apesar de apresentar um tempo de religamento próximo ao Caso II e menor que III, o seu tempo total de 11,8 h requer atenção. Um navio à deriva e sem energia representa um risco para a tripulação e seus arredores, sendo fundamental que as embarcações disponham de um método alternativo de alimentação para equipamentos e sistemas vitais, com autonomia suficiente para garantir a segurança da embarcação.

Por fim, em relação à simulação realizada para o EOL, o tempo total obtido para o restabelecimento da planta foi próximo a 20 horas. Esse intervalo é considerado excessivo para uma embarcação, e uma possível solução seria o aumento do excesso de reatividade no final de vida do combustível, garantindo assim um alto grau de disponibilidade. Rafael Castro Monteiro, Rubens Seishi Wassano

## REFERÊNCIAS

ABDELHAMEED, A. A. E.; REHMAN, H.; KIM, Y. A physics study for passively-autonomous daily load-follow operation in soluble-boron-free SMR. *Proceedings of ICAPP*, Japan, 2017.

CASTRO MONTEIRO, R.; CHANG JOO, H. Analysis of APR1400 restarting using fixed boron dilution rate approach. *Korean Energy Society Journal of Engineering*, v. 30, n. 1, 2021.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). Integral pressurized water reactor simulator manual. Viena: IAEA, 2017.

SANTOS GUIMARÃES, L. *Situação atual do desenvolvimento de SMRs.* 2024. Disponível em: www.linkedin.com/pulse/ situa%25C3%25A7%25C3%25A3o-atual-do-desenvolvimento-de-smrs-leonam-guimar%25C3%25A3es-1i9of. Acesso em: 12 jul. 2024.



## Imperium Per Scientia

Conheça o nosso site www.marinha.mil.br/dgdntm