



**Roberta Valentim Martins dos Santos**

**Descarbonização Marítima:  
Um estudo de caso aplicado à Marinha do Brasil**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Antônio Márcio Tavares Thomé  
Coorientador: Prof. Renan Silva Santos

Rio de Janeiro,  
agosto de 2024



**Roberta Valentim Martins dos Santos**

**Descarbonização Marítima:  
Um estudo de caso aplicado à Marinha do Brasil**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

**Prof. Antônio Márcio Tavares Thomé**

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

**Prof. Renan Silva Santos**

Coorientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

**Prof. Rodrigo Goyannes Gusmão Caiado**

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

**Prof. Florian Alain Yannick Pradelle**

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Prof. Leandro Gauss**

UNISINOS

Rio de Janeiro, 30 de agosto de 2024

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial, do trabalho é proibida sem autorização da autora, do orientador e da universidade.

### **Roberta Valentim Martins dos Santos**

Graduou-se em Engenharia de Produção na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2011. É oficial da Marinha do Brasil, servindo na Diretoria de Engenharia Naval. Tem experiência na área de Engenharia de Produção, com ênfase na área gerencial e de projetos.

#### Ficha Catalográfica

Santos, Roberta Valentim Martins dos

Descarbonização marítima: um estudo de caso aplicado à Marinha do Brasil / Roberta Valentim Martins dos Santos; orientador: Antônio Márcio Tavares Thomé; coorientador: Renan Silva Santos. – 2024.

155 f.: il. color.; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2024.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Sustentabilidade. 3. Descarbonização marítima. 4. Navio de guerra. 5. Análise multicritério. I. Thomé, Antônio Márcio Tavares. II. Santos, Renan Silva. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. IV. Título.

CDD: 658.5

Para todos os amigos,  
Pelo apoio e amizade durante esta jornada.

## **Agradecimentos**

Primeiramente, agradeço a mim mesma, por todo o esforço e dedicação durante este curso, e por nunca deixar de acreditar que era possível.

Agradeço a Deus, aos orixás e aos guias espirituais que me ajudaram nesta jornada, aconselhando-me e abrindo os caminhos para que isso se tornasse realidade.

Agradeço ao meu orientador, Márcio Thomé, e ao coorientador, Renan Silva, por toda a orientação, dedicação e por acreditarem neste trabalho.

Agradeço ao meu orientador técnico na Marinha do Brasil, CC(EN) Cyro, e ao CMG(RM1-EN) Angelats, por todo o apoio e colaboração, e a todos os profissionais da Marinha do Brasil que contribuíram com seu conhecimento técnico para este trabalho.

Um agradecimento especial ao meu orientador de matrícula, Felipe Scavarda, pela atenção e confiança depositadas em mim, e ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Agradeço também aos membros da banca examinadora por aceitarem participar e por contribuírem com seus conhecimentos, enriquecendo ainda mais este trabalho.

Um agradecimento especial ao meu amigo Eliseu, grande responsável pela minha inscrição neste curso, e a Paula, a maior incentivadora na escolha do tema.

Agradeço à Isadora, Rafaella, Berenice e meus amigos mais próximos, por toda a paciência, e por me trazerem calma e acolhimento durante os períodos mais difíceis.

Agradeço ao CMG (EN) Auro, por todo o auxílio e atenção durante a minha inscrição. Aos meus colegas de mestrado, pela união e dedicação durante as matérias do curso, especialmente a Maryele, Letícia, Esther e Cyntia - sem vocês, nada disso seria possível.

Agradeço à Marinha do Brasil, por confiar no meu trabalho nestes dois anos, e à PUC-Rio, por todo o suporte durante o curso.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## Resumo

dos Santos, Roberta Valentim Martins; Thomé, Antônio Márcio Tavares Thomé; Santos, Renan Silva. **Descarbonização Marítima: Um estudo de caso aplicado à Marinha do Brasil**. Rio de Janeiro, 2024. 155p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Estudos demonstram um aumento de 9,3% nas emissões marítimas de CO<sub>2</sub> entre 2012 e 2018. Nos últimos anos, muitas estratégias vêm sendo utilizadas para melhorar a eficiência dos navios e reduzir a emissão de carbono. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo identificar a solução mais adequada entre as tecnologias de descarbonização marítima disponíveis para aplicação em um navio de guerra da Marinha do Brasil. Como metodologia, é realizada uma revisão terciária da literatura e um estudo de caso, com aplicação de um método misto de análise multicritério para rankeamento e seleção de tecnologias, baseado na opinião de especialistas da Marinha do Brasil. O estudo de caso está baseado em três proposições de pesquisa: (i) é possível que a Marinha do Brasil implemente tecnologias voltadas para descarbonização em um Navio de Guerra; (ii) os resultados dos estudos são generalizáveis para outros Navios de Guerra com tamanhos e tipos de viagens similares; (iii) a Marinha do Brasil é capaz de se alinhar à teoria da ambidestria organizacional, ao implementar tecnologias novas voltadas para a descarbonização de navios. Os resultados demonstram que a utilização de motor de combustão interna com aplicação de biocombustíveis do tipo *drop-in* ainda é a escolha mais apropriada para o navio de guerra selecionado. O estudo oferece uma contribuição prática e teórica para descarbonização marítima, ao apresentar o estado da arte das tecnologias e combustíveis alternativos disponíveis, bem como sua aplicabilidade no setor naval.

### Palavras-chave:

Sustentabilidade; descarbonização marítima; navio de guerra; análise multicritério.

## **Abstract**

Dos Santos, Roberta Valentim Martins; Thomé, Antônio Márcio Tavares; Santos, Renan Silva. **Maritime Decarbonization: A Case Study Applied to the Brazilian Navy**. Rio de Janeiro, 2024. 155p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Studies show a 9.3% increase in maritime CO<sub>2</sub> emissions between 2012 and 2018. In recent years, many strategies have been employed to improve ship efficiency and reduce carbon emissions. In this context, this study aims to identify the most suitable solution among the available maritime decarbonization technologies for application to a Brazilian Navy warship. As a methodology, a tertiary review of the literature and a case study are carried out, with the application of a mixed-method multicriteria analysis for ranking and selection of technologies, based on the opinion of experts from the Brazilian Navy. The case study is based on three research propositions: (i) is it possible for the Brazilian Navy to implement technologies aimed at decarbonization in a Warship; (ii) the results of the studies are generalizable to other Warships with similar sizes and types of voyages; (iii) the Brazilian Navy is able to align itself with the theory of organizational ambidexterity, by implementing new technologies aimed at the decarbonization of ships. The results demonstrate that the use of an internal combustion engine with the application of drop-in biofuels is still the most appropriate choice for the selected warship. The study offers both practical and theoretical contributions to maritime decarbonization by presenting the state-of-the-art technologies and alternative fuels available, as well as their applicability in the naval sector.

### **Keywords:**

Sustainability; maritime decarbonization; warship; multicriteria analysis.

## Sumário

1	Introdução .....	12
1.1	Contextualização do tema .....	12
1.2	Justificativa da Pesquisa .....	14
1.3	Objetivos da pesquisa .....	15
1.4	Estrutura do trabalho .....	15
2	Referencial Teórico.....	17
2.1	Estratégias globais para a sustentabilidade marítima .....	17
2.2	Medidas para alcançar a descarbonização marítima .....	19
2.3	Políticas de Sustentabilidade na MB e nas Marinhas do Mundo.....	27
2.4	Teoria da ambidestria Organizacional e a Marinha do Brasil .....	29
2.5	Técnicas para seleção de tecnologias de descarbonização .....	31
3	Procedimentos Metodológicos.....	33
3.1	Revisão da Literatura.....	33
3.2	Estudo de caso único .....	35
4	Resultados e discussões .....	40
4.1	Resultado da revisão da literatura .....	40
4.2	Resultado do Estudo de Caso .....	92
4.3	Discussões .....	101
5	Conclusões e Pesquisas Futuras .....	108
6	Referências bibliográficas.....	111
	APÊNDICE A: MÉTODO AHP - TOPSIS .....	137
	APÊNDICE B: MATRIZES PAR A PAR PARA CRITÉRIOS DE PROPULSÃO E DE COMBUSTÍVEL.....	139
	APÊNDICE C: CÓDIGOS <i>RSTUDIO</i> PARA PESO DOS CRITÉRIOS...	141
	APÊNDICE D: MATRIZES DE JULGAMENTO DE SP EM CADA CRITÉRIO E CÓDIGO <i>RSTUDIO</i> PARA MÉTODO TOPSIS PARA SP.....	145
	APÊNDICE E: MATRIZES DE JULGAMENTO DE SC_ICE EM CADA CRITÉRIO E CÓDIGO <i>RSTUDIO</i> PARA MÉTODO TOPSIS PARA SC_ICE.....	150
	APÊNDICE F: TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (TCLE).....	155



## Lista de Figuras

Figura 1: Resumo das principais medidas da IMO. ....	18
Figura 2: Conjunto de tecnologias para descarbonização do setor marítimo. ....	19
Figura 3: Matriz Energética Brasileira. ....	22
Figura 4: Emissões de GEE de combustíveis alternativos de acordo com a fonte utilizada para a produção. ....	24
Figura 5: Protocolo PRISMA. ....	35
Figura 6: Países mais produtivos. ....	40
Figura 7: Produção Científica anual. ....	40
Figura 8: Percentual de revisões por tema. ....	41
Figura 9: Funcionamento de célula a combustível movida a hidrogênio. ....	44
Figura 10: Funcionamento de SOFC de amônia. ....	44
Figura 11: Navio Ocean bird com vela rígida. ....	47
Figura 12: Navio B9 Sail vela macia. ....	47
Figura 13: Navio MV Copenhagen com vela rotor flettner. ....	47
Figura 14: Navio SC Connector com vela rotor flettner dobrável. ....	47
Figura 15: Navio utilizando vela do tipo Kite. ....	47
Figura 16: Navio MS Turanor com energia solar. ....	50
Figura 17: Esquema de funcionamento de reator nuclear do tipo PWR. ....	51
Figura 18: Esquema de propulsão mecânica. ....	56
Figura 19: Navio elétrico com bateria e supercapacitor. ....	57
Figura 20: Exemplo de navio totalmente elétrico com utilização de célula a combustível e bateria. ....	58
Figura 21: Navio totalmente elétrico utilizando energia eólica e solar com sistema de armazenamento de energia por bateria. ....	58
Figura 22: Esquema híbrido com ICE/TG, célula a combustível e bateria/supercapacitor. ....	60
Figura 23: Exemplo de sistema híbrido com ICE e BESS. ....	61
Figura 24: Configuração híbrida em série. ....	61
Figura 25: Configuração híbrida em paralelo. ....	61
Figura 26: Configuração híbrida série-paralela. ....	62

Figura 27: Grupo A (biocombustíveis destilados adequados para motores diesel).....	63
Figura 28: Grupo B (biocombustíveis formados por álcoois e gases liquefeitos).....	64
Figura 29: Grupo C (hidrogênio, a amônia e eletrocombustíveis). ....	65
Figura 30: Percentual de redução de CO <sub>2</sub> WtW do LNG comparado ao VLSFO.....	71
Figura 31: Emissões de CO <sub>2</sub> WtW do LPG em comparação com o HFO ou diesel. ....	72
Figura 32: Percentual de redução de CO <sub>2</sub> WtW do metanol em comparação ao VLSFO.....	73
Figura 33: Percentual de redução de CO <sub>2</sub> WtW do hidrogênio em comparação ao VLSFO.....	79
Figura 34: Potencial de redução de CO <sub>2</sub> de cada tipo de amônia, em comparação com o VLSFO.....	81
Figura 35: Volume dos principais combustíveis alternativos e tradicionais. ....	83
Figura 36: Navio NPa-500MB. ....	93

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Navios das marinhas mundiais utilizando tecnologias de baixo carbono.....	29
Tabela 2: Bases de dados selecionadas. ....	33
Tabela 3: Componentes da pesquisa nas bases de dados eletrônica.....	34
Tabela 4: Táticas para testes lógicos do estudo de caso. ....	36
Tabela 5: Escala Fundamental.....	38
Tabela 6: Dimensões por tipo de tecnologia eólica com maturidade tecnológica. ....	48
Tabela 7: Custo WASP. ....	48
Tabela 8: Quadro resumo dos principais combustíveis. ....	85
Tabela 9: Características técnicas do NPa-500MB.....	93
Tabela 10: Dados dos especialistas selecionados. ....	94
Tabela 11: Soluções de propulsão.....	95
Tabela 12: Solução de combustível (SC) para ICE.....	96
Tabela 13: Solução de combustível (SC) para célula a combustível. ....	96
Tabela 14: Critérios para seleção da SP.....	97
Tabela 15: Pesos dos critérios da propulsão. ....	98
Tabela 16: Critérios para seleção da SC. ....	98
Tabela 17: Pesos dos critérios de combustível.....	99
Tabela 18: Média aritmética das matrizes de julgamento SP. ....	99
Tabela 19: <i>Ranking</i> SP no método TOPSIS. ....	99
Tabela 20: Média aritmética das matrizes de julgamento SC_ICE.....	100
Tabela 21: Ranking SC_ICE no método TOPSIS.....	100
Tabela 22: Quadro resumo da solução tecnológica ideal. ....	107
Tabela 23: Índice médio de consistência randômico .....	137

# 1 Introdução

Este capítulo apresenta a contextualização do tema, a justificativa da pesquisa, os objetivos da pesquisa, contendo as perguntas de pesquisa, e a estrutura do trabalho.

## 1.1 Contextualização do tema

As mudanças climáticas envolvem variações de longo prazo nas temperaturas e nos padrões do clima (United Nations, 2024), e as ações humanas são as grandes responsáveis de maneira incontestável pelos níveis de aquecimento global observados, especialmente devido à grande emissão de gases de efeito estufa (GEE) (IPCC, 2023), causados majoritariamente pela queima de combustíveis fósseis como o carvão, o petróleo e o gás. A queima desses combustíveis resulta na liberação de GEE, os quais retêm o calor do Sol ao redor da Terra, contribuindo para o aumento das temperaturas. Os principais gases causadores desse fenômeno são o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (United Nations, 2024), responsável por cerca de dois terços dos GEE (IPCC, 2023) e o metano (United Nations, 2024). Essas mudanças no clima, são uma ameaça real, e possivelmente irreversível, tanto para a sociedade, quanto para o nosso planeta. É primordial a cooperação internacional de forma eficaz e apropriada com o intuito de combater as altas emissões de GEE (United Nations, 2015a).

Durante a *21st Conference of the Parties (COP21)* da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, em 2015, foi estabelecido um novo acordo, conhecido como o Acordo de Paris, cujo propósito central é aprimorar a resposta global diante da ameaça das mudanças climáticas (MMA, 2024). O acordo de Paris de 2015 veio para reger medidas de redução de emissão de  $\text{CO}_2$ , a partir do ano de 2020. Houve um comprometimento dos países ratificadores em tomar medidas visando manter o aumento da temperatura média global abaixo de  $2^\circ\text{C}$ , utilizando como referência os níveis pré-industriais, com um esforço geral para que não ultrapasse  $1,5^\circ\text{C}$  (MCTI, 2017). O Brasil ratificou o acordo em 12 de setembro de 2016, e com isso, passou a ter metas denominadas de Contribuições Nacionalmente Determinadas (CND), onde se comprometeu a diminuir as emissões de GEE em 37% até 2025, e 43% até 2030, considerando os níveis de 2005. Para cumprir essas metas, o governo brasileiro se comprometeu a aumentar para cerca de 18% a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética até 2030, além de restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas, e atingir uma participação de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética até 2030 (MMA, 2024). Apesar de uma breve diminuição das emissões de  $\text{CO}_2$ , devido à pandemia da COVID-19 em 2020, o relatório sobre a Lacuna de Emissões 2020 já alertava que a trajetória indicava que o mundo estaria se encaminhando para um aumento de temperatura superior a  $3^\circ\text{C}$  ainda neste século (UNEP, 2020). Atualmente, a temperatura média global da superfície já está cerca de  $1,2^\circ\text{C}$  acima dos níveis pré-industriais. O cenário é preocupante, pois as emissões de GEE ainda não atingiram o ponto máximo previsto (IEA, 2023a). Estudos que realizaram projeções para os próximos anos indicam que o aquecimento global continuará a aumentar entre 2021 e 2040. A previsão é que, durante o século XXI, o nível definido no Acordo de Paris de  $2^\circ\text{C}$  para o aquecimento global, será ultrapassado. Para que haja uma chance disso não ocorrer, é primordial limitar as emissões cumulativas de  $\text{CO}_2$ , chegando a atingir zero emissões, e realizar reduções substanciais em outras emissões de GEE (IPCC, 2023). Alcançar emissões líquidas zero exigirá redes elétricas mais extensas, inteligentes e adaptáveis, bem como o aumento significativo na produção de combustíveis com baixas emissões, a ampliação da energia nuclear e o impulso na fabricação de materiais com quase nenhuma emissão. Até 2035,

é necessário reduzir as emissões em 80% nas economias avançadas e em 60% nos mercados emergentes e nas economias em desenvolvimento, em comparação com os níveis de 2022 (IEA, 2023a).

Em 2021 e 2022, o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) divulgou três relatórios como parte de seu sexto ciclo de avaliação. Esses relatórios fornecem as informações científicas mais recentes sobre as condições físicas do clima global, os efeitos das mudanças climáticas e as estratégias de mitigação para enfrentar essas mudanças (Climate Science, 2024). Nos últimos anos, ocorreram mudanças na atmosfera terrestre, oceano, criosfera e biosfera de forma acelerada, devido às atividades humanas, ocorrendo perdas e danos à natureza e comunidades. Foram observados impactos generalizados e substanciais relacionados à disponibilidade física de água, calor, danos causados por incêndios florestais, doenças infecciosas, desnutrição e inundações interiores, dentre outros. Além disso, foram observados diversos impactos como aumento nas temperaturas extremas, derretimento de geleiras e aumento do nível do mar. Aproximadamente 42% das emissões líquidas de CO<sub>2</sub> ocorreram no período de 1990 a 2019 (IPCC, 2023). No ano de 2023, as concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub> atingiram 422 partes por milhão, alcançando níveis mais elevados do que em qualquer momento registrado nos últimos quatorze milhões de anos (IHU, 2024).

Além do Acordo de Paris, outro marco no ano de 2015 foi o estabelecimento de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), e suas 169 metas, pela Organização das Nações Unidas (ONU). Esses objetivos e metas equilibram as três dimensões do desenvolvimento sustentável: a econômica, a social e a ambiental. Esses objetivos e metas fazem parte da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável da ONU, que é um plano de ação global que visa abordar uma série de desafios inter-relacionados, como erradicação da pobreza e da fome, saúde, educação, água potável e saneamento, igualdade de gênero e proteção ambiental (United Nations, 2015b). Os 193 Estados membros da ONU, incluindo o Brasil, comprometeram-se a adotar e cumprir os ODS da referida Agenda, considerada uma das mais audaciosas da história (UNICEF, 2024).

Nesse cenário de emissões, alguns setores, como o de transporte, estão entre os principais responsáveis pela liberação de CO<sub>2</sub> na atmosfera (United Nations, 2024). O transporte marítimo é responsável por mais de 90% do comércio global, movimentando mais de 10 bilhões de toneladas de contêineres por ano (Walker et al., 2019). Embora o transporte marítimo seja amplamente reconhecido como o meio mais econômico, eficiente e de menor impacto ambiental para o transporte de mercadorias, ele ainda gera impactos ambientais negativos (Melón, 2018). Os motores marítimos utilizam predominantemente óleos combustíveis derivados de formulações que incluem frações pesadas da destilação, provenientes de resíduos (Petrobras, 2021), contendo alto teor de enxofre, alta viscosidade, e metais pesados (Zhu et al., 2022). Algumas substâncias geradas, como óxidos de nitrogênio (NOx), óxidos de enxofre (SOx), material particulado (PM) e CO<sub>2</sub> têm grande impacto, não só no meio ambiente, como na saúde humana (Mueller et al., 2023). O quarto Estudo de GEE de 2020 mostra que a participação das emissões de navios com relação às emissões globais desses gases correspondia a 2,89% em 2018, um aumento de 0,13% com relação a 2012. As emissões marítimas de CO<sub>2</sub> cresceram 9,3% entre esses mesmos anos (IMO, 2020).

A *International Maritime Organization* (IMO), agência especializada da ONU responsável pela regulamentação do transporte marítimo internacional, trabalha para criar diretrizes que garantam a segurança do setor naval, que ele continue ambientalmente saudável, que esteja protegido e tenha eficiência energética. Entre suas principais metas estão preocupar-se em promover o transporte e o desenvolvimento marítimo de maneira sustentável. A organização está ativamente envolvida na implementação da Agenda 2030 para o Desenvolvimento

Sustentável e seus ODS relacionados. Além disso, a IMO está comprometida em criar e aplicar regras globais para, por exemplo, promover a eficiência energética, adotar novas tecnologias e inovações e desenvolver a infraestrutura marítima (IMO, 2024a).

A IMO possui 175 países-membros, dos quais o Brasil faz parte desde 1963 (IMO, 2024b). Sendo assim, o setor marítimo brasileiro deve estar alinhado com as diretrizes da Organização. A IMO está ativamente engajada em uma abordagem global para aprimorar a eficiência energética das embarcações e diminuir as emissões de GEE (IMO, 2024c). É constituída por cinco comitês principais, dentre eles, o *Marine Environment Protection Committee* (MEPC) (IMO, 2024d). A organização atua em alinhamento com os 17 ODS da ONU, onde dois deles, o ODS 7 e o ODS 13, se destacam no contexto da descarbonização marítima. O ODS 7 tem como objetivo garantir o acesso universal e sustentável à energia. Isso inclui aumentar substancialmente a participação de energias renováveis no mix energético global, bem como fortalecer a cooperação internacional para facilitar o acesso a pesquisa e tecnologias relacionadas à energia limpa, garantindo que sejam acessíveis a todos. O ODS 13 tem como foco o combate às mudanças climáticas, destacando metas como a incorporação de considerações climáticas em políticas nacionais, a melhoria na educação sobre mitigação e redução de impactos, e o cumprimento de compromissos, como o financiamento anual a países em desenvolvimento, conforme acordado no Acordo de Paris. A IMO está ativamente envolvida na promoção de financiamento, pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de energia limpa para a indústria marítima, bem como na implementação de medidas para controlar as emissões e reduzir o impacto do transporte marítimo nas mudanças climáticas (IMO, 2024e).

A Marinha do Brasil (MB), como Autoridade Marítima, atua, utilizando de sua estrutura física, pessoal e de seus meios navais, na fiscalização e no combate aos danos ambientais gerados por navios (Almeida & Souza, 2022). Em sua visão de futuro, a MB aspira se posicionar como uma força moderna, com alto grau de independência tecnológica (BRASIL, 2016a). Os navios de guerra, assim como os mercantes, podem ser geradores de diversos tipos de poluição, e apesar de serem considerados exceções nos acordos ambientais, devido à imunidade soberana atribuída a eles, se alinham com dimensões ambientais previstas na Política Nacional de Defesa, como as previstas no Livro Verde de Defesa Nacional e no Livro Branco de Defesa Nacional. Os navios de guerra e a questão da poluição por eles gerada são assuntos que recebem pouca atenção em estudos acadêmicos, resultando em uma quantidade baixa de trabalhos sobre o tema (Almeida & Souza, 2022). Aumentar os estudos acadêmicos voltados para esse tipo de navio se torna necessário, para que a Marinha do futuro consiga acompanhar as necessidades de descarbonização do setor naval. Além disso, para que tecnologias de inovação ligadas a descarbonização sejam implementadas e utilizadas pela MB é importante que a organização seja capaz de praticar a ambidestria. Segundo Tushman & O'Reilly (1996), para que as Organizações tenham sucesso a longo prazo, é essencial que elas sejam ambidestras, ou seja, que possam realizar tanto mudanças incrementais quanto mudanças inovadoras.

## 1.2 Justificativa da Pesquisa

Apesar da isenção dos navios de guerra em acordos ambientais devido à imunidade soberana atribuída a eles (Almeida & Souza, 2022), é crucial que a MB leve em consideração a questão das mudanças climáticas. Isso não apenas por ser um órgão do Governo Federal e, portanto, um modelo a ser seguido, mas também devido à possibilidade iminente de que a redução de emissões se torne obrigatória para os navios de guerra. Considerando que atualmente não há na MB

um plano de descarbonização de suas embarcações ou de construção de navios com menor pegada de carbono, é imperativo conduzir um estudo para avaliar as melhores tecnologias e aplicações disponíveis, identificando soluções viáveis e eficazes que possam ser incorporadas, levando em conta as especificidades de um navio de guerra. Aumentar o número de estudos acadêmicos dedicados a esse tipo de navio é necessário para que a MB se mantenha alinhada com a sua visão de futuro (BRASIL, 2016a), ao mesmo tempo que atende às exigências de descarbonização do setor naval, contribuindo assim para a redução dos impactos ambientais e melhorando sua imagem perante a sociedade e as instituições internacionais. Além disso, diante do rápido avanço das tecnologias de descarbonização marítima, é crucial realizar um mapeamento do estado da arte, permitindo que tanto a MB quanto o setor naval como um todo acompanhem as crescentes exigências de redução de emissões e possam adotar as soluções tecnológicas mais avançadas disponíveis.

### 1.3 Objetivos da pesquisa

Este estudo tem como objetivo identificar a solução mais adequada entre as tecnologias de descarbonização marítima disponíveis para aplicação em um navio de guerra da Marinha do Brasil. Para isso, será realizada uma revisão abrangente da literatura, abordando os avanços e melhores práticas na área, seguida de um estudo de caso único. O ranqueamento de soluções e seleção da solução tecnológica mais apropriada serão obtidos através de uma abordagem mista do método *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM). O propósito do estudo de caso único é proporcionar uma compreensão empírica de conceitos ou princípios teóricos, gerando descobertas que possam ser generalizadas, que vão além do contexto específico do caso estudado (Yin, 2018). Para isso foram elaboradas as seguintes perguntas de pesquisa (PP):

PP1: Quais são as soluções tecnológicas de descarbonização marítima encontradas na literatura?

PP2: Quais são as vantagens e desvantagens da utilização dessas tecnologias em navios?

PP3: Quais são as tecnologias que podem ser aplicadas ao modelo de Navio de Guerra selecionado para estudo?

PP4: A MB é capaz de ser ambidestra, explorando inovações, ao mesmo tempo que mantém e incrementa suas atividades atuais?

Decorre das perguntas de pesquisa as seguintes proposições teóricas para direcionar o planejamento, coleta de dados e análise (Yin, 2018):

I: É possível que a MB implemente tecnologias voltadas para descarbonização em um Navio de Guerra.

II: Os resultados dos estudos são generalizáveis para outros Navios de Guerra com tamanhos e tipos de viagens similares.

III: A MB é capaz de se alinhar à teoria da ambidestria organizacional, ao implementar tecnologias novas voltadas para a descarbonização de navios.

### 1.4 Estrutura do trabalho

Esta dissertação foi dividida em 5 capítulos: introdução, referencial teórico, procedimentos metodológicos, resultados e discussões, e conclusão e pesquisas futuras. Na introdução, foi apresentada uma visão geral sobre o tema, contextualizando e demonstrando a sua importância. Também foram demonstrados a justificativa da pesquisa e os objetivos do trabalho, juntamente com as perguntas de pesquisa que o estudo visa responder. No referencial teórico, foram exploradas as teorias e conceitos relevantes para o tema, através de uma

análise da literatura, como forma de sustentação da pesquisa. Nos procedimentos metodológicos, será detalhada a metodologia utilizada, como passos da revisão da literatura, métodos para realização do estudo de caso e análise multicritério adotada. No capítulo de resultados e discussões, os resultados do estudo serão apresentados e interpretados, analisando as descobertas e discutindo suas implicações. Na conclusão, serão resumidas as descobertas do estudo, enfatizando a relevância e contribuição, além de destacar as possíveis áreas para investigações futuras.



## 2 Referencial Teórico

Este capítulo apresenta o referencial teórico que fundamenta a pesquisa: estratégias globais para a sustentabilidade marítima, medidas para alcançar a descarbonização marítima, políticas de sustentabilidade na MB e nas marinhas do mundo, teoria de ambidestria organizacional e a Marinha do Brasil, e técnicas para Seleção de tecnologias de descarbonização.

### 2.1 Estratégias globais para a sustentabilidade marítima

Descarbonização é um processo de redução de emissões de carbono na atmosfera, especialmente de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). A descarbonização tem como objetivo alcançar uma economia global com baixas emissões para conseguir a harmonia climática por meio da transição energética (de Souza, 2024). O objetivo de alcançar emissões líquidas zero na indústria naval envolve o processo de descarbonização, que consiste em diminuir a quantidade de CO<sub>2</sub> gerado pelas atividades marítimas (Yang et al., 2023). Fontes de energia renováveis, tecnologias e práticas de eficiência energética estão sendo utilizadas para atender aos inúmeros requisitos neste campo. Além disso, diversas instituições, como Universidades, estão envidando esforços para buscar estratégias de descarbonização (Filho et al., 2023).

Em 15 de julho de 2011, a IMO aprovou o pioneiro conjunto de medidas internacionais obrigatórias destinadas a melhorar a eficiência energética das embarcações, que abrangiam duas principais iniciativas, implementar o *Energy Efficiency Design Index* (EEDI) e o *Ship Energy Efficiency Management Plan* (SEEMP), que entraram em vigor em 1º de janeiro de 2013. Essas medidas representam o primeiro regime global obrigatório de redução de GEE no setor marítimo. Ao longo da última década, essas medidas incentivaram o desenvolvimento e a adoção de tecnologias energeticamente eficientes. O SEEMP exige que as embarcações elaborem e implementem planos para otimizar a eficiência energética operacional (IMO, 2024c).

A partir de 2011, a IMO implementou novas medidas regulatórias e, em 2018, desenvolveu a estratégia inicial de GEE da IMO, que estabeleceu metas para a redução de emissões de GEE por navios. No ano de 2023, a estratégia inicial de 2018 foi revista, e a organização estabeleceu a "Estratégia da IMO de 2023", com metas de redução das emissões de carbono mais rígidas, que visam alcançar uma diminuição mínima de 40% até 2030, além de reduzir o total anual de emissões de GEE do transporte marítimo internacional, pelo menos 20%, almejando 30%, até 2030, e em pelo menos 70%, almejando 80%, até 2040, em comparação com 2008. Além disso, a organização destaca o objetivo de alcançar, até 2030, pelo menos 5%, com esforço para 10%, de que a energia utilizada nesse setor provenha de tecnologias, combustíveis ou fontes de energia com emissões de GEE zero ou próximas de zero. A meta é atingir emissões líquidas de GEE zero até 2050 (IMO, 2023a). Desde 1º de janeiro de 2023, os navios são obrigados a calcular o seu Índice de *Energy Efficiency Existing Ship Index* (EEXI) e seu indicador operacional anual de intensidade de carbono (CII) e classificação CII. O EEXI alcançado por uma embarcação demonstra sua eficiência energética comparado a um valor de referência e é aplicável a navios com arqueação bruta igual ou superior a 400 toneladas (IMO, 2024f). O CII é uma medida da eficiência energética de um navio e é dado em gramas de CO<sub>2</sub> emitido por capacidade de carga e milha náutica. O primeiro ano da verificação operacional anual CII alcançada será 2024 para a operação referente ao ano de 2023. Com base no seu desempenho, as embarcações receberão uma classificação ambiental de A (maior superior), B (menor superior), C (moderado), D (menor inferior) ou E (nível de desempenho inferior) (DNV, 2024a). A Figura 1 apresenta um resumo das

principais medidas da IMO, com a definição, data de implementação, aplicação e sugestão de tecnologias para melhorar a eficiência em cada medida.

	EEDI	SEEMP	EEXI	CII
Definição	Mede a eficiência energética e é expresso em gramas de CO <sub>2</sub> por tonelada milha do navio (quanto menor o EEDI, mais eficiente é o projeto do navio).	Ferramenta estruturada em três partes: Parte I: Plano de gestão do navio para melhorar a eficiência energética. Parte II: Plano de coleta de dados sobre consumo de óleo combustível do navio. Parte III: Plano operacional de intensidade de carbono do navio.	Mede a eficiência energética de navios existentes em comparação a uma linha de base estabelecida (O EEXI exigido).	Mede a intensidade de carbono operacional anual de um navio, ligando as emissões de CO <sub>2</sub> à quantidade de carga transportada e à distância percorrida. Com base no CII, os navios são classificados em A, B, C, D ou E (A melhor).
Data	1º de janeiro de 2013	1º de janeiro de 2013	1º de janeiro de 2023	1º de janeiro de 2023
Aplicação	Aplicado a novos projetos de navios.  Diversos tipos de navios.	Parte I: Obrigatória para navios acima de 400 GT. Parte II: obrigatória para navios acima de 5.000 GT. Parte III : requerida para todos os navios sujeitos ao Indicador de Intensidade de Carbono (CII)	Aplicado a navios de 400 GT ou mais	Aplicado a navios de 5.000 GT ou mais
Tecnologias	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Melhorias no <i>design</i> do casco</li> <li>. Recuperação de calor residual</li> <li>. Redução do consumo elétrico</li> <li>. Outras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Otimização da velocidade</li> <li>. Roteamento meteorológico</li> <li>. Monitoramento e manutenção do casco</li> <li>. Instalação de sistemas de recuperação</li> <li>. Outras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Limitação de potência</li> <li>. Uso de energia eólica</li> <li>. Otimização da hélice</li> <li>. Outras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Otimização de velocidade</li> <li>. uso de combustíveis alternativos</li> <li>. Outras</li> </ul>

Figura 1: Resumo das principais medidas da IMO.

Fonte: Adaptada de IMO (2024c); IMO (2024f); DNV (2024a), DNV (2024b), DNV (2024c).

Durante a *28th Conference of the Parties (COP28)*, realizada de 30 de novembro a 12 de dezembro de 2023, a IMO destacou as metas de redução de CO<sub>2</sub> e GEE em sua Estratégia de GEE de 2023. Para assegurar o alcance efetivo dessas metas, a organização planeja implementar medidas de médio prazo. Estas incluem a introdução de uma norma técnica para combustíveis navais e um mecanismo econômico de precificação das emissões de GEE. Essas medidas serão adotadas após uma avaliação abrangente de impacto em 2025 e entrarão em vigor em 2027, com o objetivo de impulsionar a mudança para fontes de energia mais sustentáveis no transporte marítimo (IMO, 2023b).

Além disso, durante a 80ª reunião do MEPC em 7 de julho de 2023, foram adotadas as Diretrizes sobre a intensidade de GEE ao longo do ciclo de vida dos combustíveis marítimos. Essas diretrizes abordam a intensidade de GEE do *Well-to-tank (WtT)*, ou seja, da extração até o tanque do navio, *Tank-to-wake (TtW)*, ou seja, durante a combustão no navio, e do *Well-to-wake (WtW)*. O desenvolvimento do *framework* do ciclo de vida ainda está em andamento e é elaborado de forma contínua (IMO, 2024g). Os principais desafios para sua elaboração englobam questões como a forma de contabilizar as emissões diretas e indiretas provenientes do uso do solo na produção de biocombustíveis; a intensidade de GEE da eletricidade utilizada para a produção de combustível; a aplicação de *carbon capture and storage (CCS)*, entre outros fatores (DNV, 2023).

## 2.2 Medidas para alcançar a descarbonização marítima

Segundo o relatório da *United Nations Conference on Trade and Development* (UNCTAD) de junho de 2023 sobre a Descarbonização marítima, durante o período de transição, é importante ações como a adoção de fontes de energia sem emissões, a realização de melhorias no projeto das embarcações, a implementação de uma abordagem integrada, envolvendo toda a cadeia de suprimento, além de uma colaboração a nível global e incentivos econômicos por parte de governos (Voces, 2023). É necessário aumentar a produção eficiente de combustíveis de baixo carbono e estabelecer infraestruturas portuárias globais para atender aos navios que utilizam esses combustíveis (MI, 2024).

Existem diversos desafios para a descarbonização do setor marítimo, como questões relacionadas à segurança da utilização de novas tecnologias, falta de conhecimento técnico na área e altos custos. A criação de corredores marítimos verdes, que consistem em rotas ou regiões específicas que são designadas ou planejadas para facilitar o transporte sustentável e ambientalmente amigável, têm o potencial de acelerar a adoção de combustíveis de baixo carbono (DNV, 2023).

### 2.2.1 Tecnologias de descarbonização

Para se alcançar uma redução significativa das emissões de GEE no setor marítimo é essencial a transição para tecnologias, combustíveis e/ou fontes de energia com zero ou quase zero emissões. A decisão sobre as tecnologias de descarbonização a serem implementadas são complexas e possuem custos altos. As principais soluções estão atreladas a projetos de navios, sistemas de propulsão e fornecimento de combustível. A escolha final dependerá de diversos parâmetros, como o tamanho do navio e o tipo de operação ou serviço que será realizado (DNV, 2023). A Figura 2 apresenta o conjunto de possíveis soluções para descarbonização do setor marítimo, divididas em cinco áreas principais, com o potencial de GEE estimado para cada grupo.

Logística e Digitalização	Hidrodinâmica	Maquinário	Energia	Pós-tratamento
Redução de GEE: mínimo 20%	Redução de GEE: entre 5% a 15%	Redução de GEE: entre 5% a 100%	Redução de GEE: entre 0% a 100%	Redução de GEE: entre 0% a 90%
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Redução de velocidade</li> <li>-Utilização do navio</li> <li>-Tamanho do navio</li> <li>-Rotas alternativas</li> <li>-Simulação e Otimização</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Revestimento de casco</li> <li>-Otimização da forma do casco</li> <li>-Lubrificação por ar</li> <li>-Limpeza</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Melhorias na eficiência de maquinário</li> <li>-Recuperação de calor residual</li> <li>-Redução de potência do motor</li> <li>-Hibridização com bateria</li> <li>-Células a combustível</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-LNG e LPG</li> <li>-Biocombustíveis (Biodiesel, HVO, SVO, ATD, FT-Diesel, biometanol, bioetanol, Biometano, Bio-LPG)</li> <li>-Hidrogênio verde</li> <li>-Amônia verde</li> <li>-Eletrocombustíveis</li> <li>-Energia eólica</li> <li>-Energia solar</li> <li>-Energia Nuclear</li> <li>-Eletrificação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Captura e armazenamento de carbono (CCS)</li> </ul>

Figura 2: Conjunto de tecnologias para descarbonização do setor marítimo.

Fonte: Adaptado de DNV (2023), Tay & Konovessis (2023) e Carvalho et al. (2021).

As principais áreas de "Logística e Digitalização", "Hidrodinâmica", "Maquinário", "Energia" e "Pós-tratamento" serão descritas a seguir.

### 2.2.1.1 Logística e Digitalização

O caminho futuro para alcançar a descarbonização marítima, provavelmente envolverá a adoção de múltiplas soluções (Campbell et al., 2021). Uma das abordagens é a redução da velocidade do navio, que pode ajudar na diminuição das emissões ao reduzir o consumo de combustível. Dado que a relação entre consumo de combustível e velocidade de navegação não é linear, mas sim proporcional ao cubo da velocidade do navio, uma pequena redução na velocidade pode resultar em uma significativa economia de combustível. A redução de velocidade pode ser implementada através de medidas operacionais ou mudanças tecnológicas (CEBRI, 2023). A economia de combustível pode variar entre 20 a 40% por viagem, dependendo da velocidade utilizada e do tipo da embarcação. Porém, a duração da viagem pode ser até 30% maior (EPE, 2019).

Os sistemas digitais e "inteligentes" em navios proporcionam grandes benefícios ao melhorar a eficiência operacional (DNV, 2023). A Transpetro, maior companhia de logística multimodal de petróleo, derivados e biocombustíveis da América Latina, ressaltou que utiliza algoritmos para a otimização de rotas, o que auxilia o comandante na escolha do trajeto mais eficiente (Transpetro, 2024). Os modelos de simulação oferecem oportunidades abrangentes de desenvolvimento na área de redução de emissões como, por exemplo, problemas de gestão de energia (Krčum et al., 2018). O acompanhamento de dados de operação do navio é vital para alcançar a otimização dos padrões operacionais das embarcações, tendo um potencial de redução do consumo de combustível de até 20% (CEBRI, 2023). Atualmente, o *Automatic Identification System* (AIS) ainda é o método mais eficiente utilizado para estimar as emissões de GEE nos navios (Chen & Yang, 2024). O AIS permite a segmentação de dados e a criação de representações visuais para análises, tais como previsões de emissões e planejamento de rotas (Ten et al., 2023). Nos últimos anos, a aplicação de métodos de aprendizado de máquina no gerenciamento de emissões tem ganhado destaque (Qi et al., 2021). Em especial, o uso de *big data* tem se mostrado promissor para criar modelos de previsão de emissões e consumo de energia (Wang, K. et al., 2022).

### 2.2.1.2 Hidrodinâmica

Melhorias na hidrodinâmica dos navios, visando a redução da resistência à água, podem contribuir significativamente para a diminuição das emissões (Wang et al., 2023). Alterações estruturais como, por exemplo, otimização do casco, uso de materiais mais leves e lubrificação por ar, dentre outros, têm o potencial de economizar combustível e, conseqüentemente, reduzir as emissões (Huang & Duan, 2023). A otimização da forma do casco se destaca devido ao impacto direto no desempenho da embarcação, podendo reduzir o consumo de combustível e as emissões de CO<sub>2</sub> em até 15% para grandes navios. No entanto, para ser eficaz, é crucial que o navio opere dentro de uma faixa de velocidade recomendada (Winnes et al., 2015).

A implementação de tecnologias de revestimento também pode ajudar a diminuir as emissões. Entre os tipos de revestimento, o não biocida é visto como o mais ecológico e economicamente vantajoso (Huang & Duan, 2023). A empresa TRANSPETRO, por exemplo, utiliza em seus navios tintas de alta tecnologia que previnem a incrustação no casco. Essa medida contribui significativamente para a redução do consumo de combustível e das emissões de GEE (Transpetro, 2024). Além disso, podem ser implementadas diversas medidas para aprimorar a eficiência operacional, como a limpeza do casco e do hélice (DNV, 2023).

O *Air Lubrication System* (ALS), ou sistema de lubrificação por ar, pode contribuir para diminuir o arrasto de uma embarcação. Esse processo consiste em injetar continuamente bolhas de ar na camada limite da superfície do casco, criando uma fina camada de ar na superfície do navio. As bolhas de ar formam um fluxo que cobre mais de 80% da área da superfície do casco. Isso oferece diversos benefícios, como a redução do arrasto, economia de energia e diminuição das emissões de GEE (Huang & Duan, 2023). Já foram instalados ou encomendados ALS para mais de 250 embarcações (DNV, 2023).

### 2.2.1.3 Maquinário

Atualmente, existe um número limitado de alternativas de módulos de geração de energia para aplicação em navios. A quase totalidade dos navios utiliza motores de combustão interna, principalmente motores a diesel (Inal et al., 2022). Os motores utilizados em navios são componentes essenciais que garantem a propulsão e fornecem energia, porém, também são fontes significativas de emissões de GEE. Essas emissões são determinadas pelas especificações do motor e são consideravelmente afetadas pela carga e o tipo de combustível utilizado. Diferentes tipos e tamanhos de motores podem ser empregados, dependendo do tipo de combustível utilizado, e o consumo de combustível varia de acordo com as características individuais de cada motor (Karvounis et al., 2022). Geralmente, os navios empregam motores de dois tempos para operações de alta potência e baixa velocidade, ou motores de quatro tempos de velocidade média, que são conectados a uma caixa de câmbio para a propulsão principal (Chiong et al., 2021). É crucial manter uma manutenção periódica no motor para melhorar a eficiência operacional (DNV, 2023).

Como métodos de propulsão, temos as configurações mecânica, elétrica e híbrida (Wang et al., 2024). A utilização de tecnologias elétricas é essencial para tornar o setor marítimo mais eficiente e sustentável. A propulsão elétrica híbrida, combinando propulsão mecânica e elétrica, é uma etapa importante nessa transição (Shagar et al. 2017), sendo viáveis tanto para novos projetos quanto para embarcações existentes (Huang & Duan, 2023). Normalmente, a propulsão híbrida combina motores convencionais de combustão interna e módulos de energia e armazenamento elétricos (Shagar et al., 2017). A integração desses sistemas com a propulsão híbrida, especialmente quando combinada com a adoção de combustíveis alternativos nos motores de combustão interna, também tem uma importância significativa na redução de emissões e, conseqüentemente, do impacto ambiental (Jelić et al., 2021).

Na busca da indústria naval por tecnologias de propulsão eficazes e de baixas emissões, as células a combustível são vistas como uma alternativa promissora. Porém, há a necessidade de aprimoramento nos aspectos relacionados à energia, design, segurança e operações (Li et al., 2024). A implementação de sistemas de armazenamento de energia, conhecido como *Energy Storage System* (ESS) é essencial, não só para navios elétricos, como também para navios híbridos, pois possibilita que um motor de combustão interna opere de forma eficiente, gerando uma redução do consumo de combustível e, conseqüentemente, das emissões de GEE. O ESS mais comum usado em navios são as baterias (Inal et al., 2022). Outra opção, normalmente complementar às baterias, são os supercapacitores (Jelić et al., 2021; Inal et al., 2022). As fontes de energia renovável também têm ganhado destaque, pois conseguem gerar energia limpa, alinhando-se com as preocupações ambientais (Inal et al., 2022).

Outra forma de alcançar a redução de emissões é a implementação de *derating*, ou redução de potência, em motores convencionais. Nesse processo, os motores são ajustados para operar de forma otimizada em cargas mais baixas, o que melhora a eficiência na combustão e, conseqüentemente, a eficiência do

combustível (Wärtsilä, 2023a; ABS, 2024a). Além do *de-rating*, uma estratégia que vem sendo destacada para melhorar a eficiência das embarcações, reduzindo o consumo de combustível, é a utilização de um sistema de recuperação de calor residual. Esse sistema, conhecido como *Waste Heat Recovery System* (WHRS), utiliza o calor residual gerado pelos motores das embarcações para produzir energia adicional. Estima-se que a energia recuperada possa atingir até 11% da potência primária do motor, resultando em uma redução no consumo de combustível do motor principal de 3% a 8% (Olaniyi & Prause, 2020).

#### 2.2.1.4 Energia

As fontes de energia renovável são essenciais para diminuir o impacto ambiental no mundo. Triplicar o uso dessas energias e dobrar a eficiência energética até 2030 são destacados como caminho essencial e mais realista para estar alinhado aos objetivos do Acordo de Paris e possibilitar a transição energética (IRENA, 2023a).

Atualmente as fontes renováveis como solar, eólica e geotérmica juntas correspondem a apenas 2,7% da matriz energética mundial. Se considerarmos também a energia hidráulica e biomassa, essa soma chega a cerca de 15%. Ao analisarmos somente o Brasil, verificamos que a matriz energética brasileira é diferente do apresentado mundialmente. O país utiliza muito mais fontes renováveis ou não provenientes de petróleo e derivados, do que o resto do mundo. Somando lenha e carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana, eólica e solar, nuclear e outras renováveis, o total é de 48,7%, quase metade da matriz energética (EPE, 2023). A Figura 3 apresenta a composição da matriz energética brasileira em 2022.

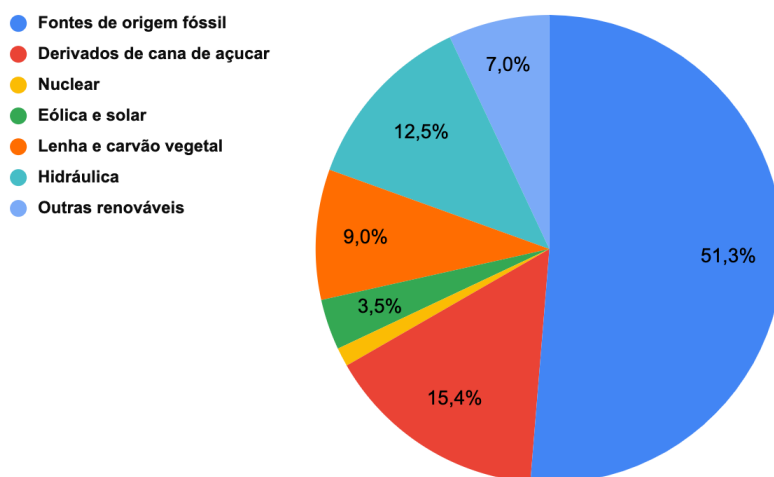


Figura 3: Matriz Energética Brasileira.  
Fonte: Adaptada de EPE (2023).

A seleção de novos sistemas de propulsão com a escolha de combustível apropriado são elementos cruciais para atingir requisitos de sustentabilidade e redução de emissões de GEE, e obter eficiência energética nos navios (Nguyen et al., 2021). Existem dois tipos principais de combustíveis marítimos convencionais. O primeiro é conhecido como *Bunker* ou *Intermediate Fuel Oil* (IFO), ou *Heavy Fuel Oil* (HFO), e é normalmente utilizado em motores principais de navios de grande porte. O segundo tipo é o Diesel Marítimo (DMA) ou *Marine Gasoil* (MGO), utilizado em motores de propulsão de embarcações de médio e pequeno porte. Em 2018, o Brasil gerou aproximadamente 5,3 milhões de toneladas de combustível marítimo (EPE, 2019).

Como os combustíveis fósseis contribuem para o aquecimento global, fontes de energia alternativas e sustentáveis devem ser utilizadas como substituição, para minimizar as emissões de GEE, como CO<sub>2</sub> (Neuling & Kaltschmitt, 2017). Nesse cenário, é esperado que os combustíveis alternativos desempenhem o papel principal na descarbonização do setor marítimo e gerem os maiores benefícios em termos de redução de emissões (ABS, 2021). Combustíveis marítimos alternativos são considerados qualquer tipo de combustível utilizado que não seja um combustível fóssil (UM, 2018). Estima-se que atualmente somente 0,1% dos combustíveis utilizados pela navegação mercante sejam combustíveis alternativos, e 99,9% combustíveis fósseis (DNV, 2023).

Com relação às emissões de GEE, existem três formas de serem contabilizadas. A WtT, ou poço ao tanque, contabiliza as emissões de GEE na produção e distribuição de cada combustível. Já o TtW, ou tanque à esteira, contabiliza os GEE provenientes da queima no próprio navio. O WtW, ou poço ao à esteira, leva em consideração o somatório de GEE gerado no WtT e no TtW, ou seja, durante o ciclo de vida do combustível. Atualmente, a maioria dos combustíveis utilizados são derivados de fontes fósseis, enquanto uma pequena quantidade é produzida a partir de fontes alternativas, com ou sem a utilização de energias renováveis. Dessa forma, o nível de emissões de GEE varia de acordo com diversos parâmetros, como a fonte de combustível, as etapas de purificação e refino, e a forma como é transportado (ABS, 2021). Com base nestes parâmetros, a indústria introduziu o seguinte esquema de codificação por cores para descrever os diferentes combustíveis:

Cinza: combustíveis produzidos a partir de fontes fósseis sem o uso de energia renovável ou tecnologias de controle de emissões.

Verde: combustíveis produzidos a partir de energia renovável, como eólica ou solar, ou fontes que não possuem origem fóssil, como biomassa.

Azul: combustíveis produzidos a partir de fontes fósseis com aplicação de tecnologias de controle de emissões, como CCS.

Laranja: mistura de combustíveis azuis, cinza ou verdes. São utilizadas, pois podem ajudar a reduzir as emissões com custos mais baixos. Para os próximos capítulos a codificação laranja representa uma mistura de combustível formada por 50% verde e 50% cinza (ABS, 2021).

Os biocombustíveis representam uma opção viável de combustível alternativo (DNV, 2023). Assim como combustíveis convencionais, os biocombustíveis geram emissões de GEE durante a combustão, ou seja, na fase TtW. Porém, durante a extração da matéria-prima essas emissões podem ser compensadas, tornando esses biocombustíveis neutros em carbono. Esses combustíveis alternativos podem ser excelentes para reduzir o impacto ambiental gerado pelo setor marítimo, desde que se leve em consideração todo o ciclo de vida, ou seja as emissões a nível WtW (ABS, 2021). A Figura 4 demonstra como as emissões de GEE podem ser neutralizadas ou não, de acordo com a fonte utilizada para a produção, em cada processo do ciclo de vida.

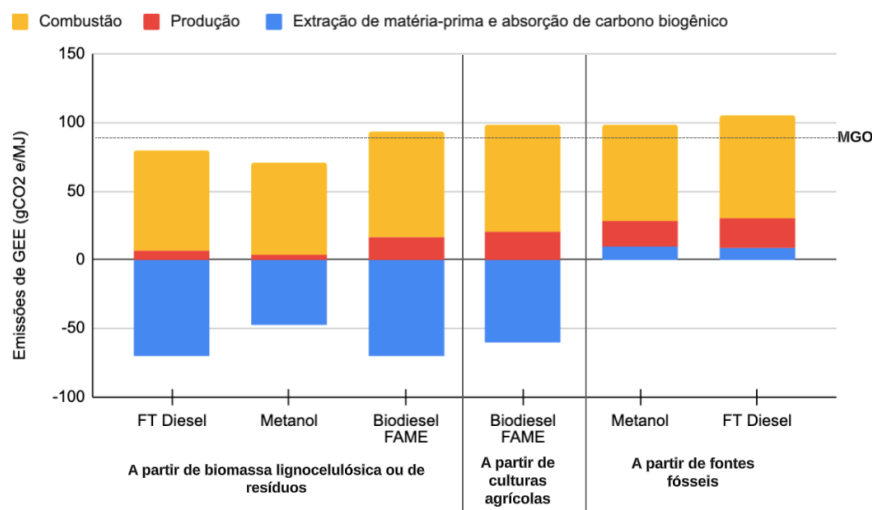


Figura 4: Emissões de GEE de combustíveis alternativos de acordo com a fonte utilizada para a produção.

Fonte: Adaptado de ABS (2021).

Observa-se que os biocombustíveis produzidos a partir de resíduos e biomassa lignocelulósica oferecem as reduções maiores de GEE, podendo ser de 70 a 100% mais baixas, quando comparados ao MGO. Isso ocorre pelo fato de ocorrer menos impacto de utilização da terra, à absorção de carbono biogênico e uso em menor escala de energia de combustíveis fósseis no processo de conversão da matéria-prima. Já os biocombustíveis produzidos a partir de fonte fóssil geram emissões próximas do MGO, se compararmos o ciclo de vida (ABS, 2021). A produção de biocombustíveis a partir de resíduos alimentares é ideal, pois também se alinha com os objetivos da ONU de economia circular e do quadro de desenvolvimento sustentável (Tay & Konovessis, 2023).

Na avaliação das emissões ao longo do ciclo de vida dos biocombustíveis, as emissões significativas resultantes de mudanças diretas e indiretas no uso da terra representam uma preocupação relevante para a sustentabilidade, especialmente no que diz respeito ao cultivo e à colheita da biomassa (DNV, 2023). É essencial considerar esses aspectos ao contabilizar essas emissões. As mudanças diretas no uso da terra ocorrem quando se transforma diretamente uma área de terra que antes tinha um uso diferente, como terras florestais, para cultivar matéria-prima para biocombustíveis. Já as mudanças indiretas ocorrem quando a terra utilizada para produção de alimentos passa a ser utilizada para biocombustíveis, e a necessidade de produção desses alimentos permanece, sendo deslocada para novas áreas, podendo gerar desmatamentos (Carneiro et al., 2017). Além dos desafios ligados à redução da produção de alimentos, há também questões relacionadas ao uso intensivo de água (Santos et al., 2021), risco de contaminação de recursos hídricos, desmatamento e degradação do solo (Kovacova & Lázaro, 2021).

A produção de biocombustíveis em quantidade apresenta desafios econômicos e gerenciais (Popp et al., 2014). Existe uma tendência de redução nos custos médios dos biocombustíveis conforme a escala de produção aumenta, tornando-os mais acessíveis e competitivos. Em contrapartida, é provável que o aumento na produção leve a uma maior demanda por terras para cultivo, gerando preocupações relacionadas a questões como a segurança alimentar e o desenvolvimento rural (Ciggin et al., 2021). Espera-se que os biocombustíveis tenham um papel importante para a transição energética, até que o hidrogênio e a amônia tenham uma maior disponibilidade. O Brasil possui vastas áreas de terras disponíveis, especialmente para culturas como soja, girassol, algodão, babaçu, dendê, mamona, amendoim e gergelim, o que representa um enorme



potencial para aumentar a produção de biocombustíveis sem comprometer a produção de alimentos (MME, 2022).

Recentemente, tem havido um crescente interesse dos pesquisadores nos combustíveis metanol, amônia e hidrogênio (Ampah et al., 2020), especialmente quando utilizados em projetos de menor escala (Karvounis et al., 2022). O hidrogênio verde emergiu como uma promissora fonte de energia futura, por ser considerado uma fonte limpa e renovável. Sua importância é crucial para a indústria marítima (IRENA, 2023b). Para uma adoção mais ampla do hidrogênio será necessário aumentar o fornecimento global em mais de cinco vezes até 2050 o que exigirá um aumento da produção de renováveis, utilizadas no processo de produção (IRENA & WTO, 2023). O metanol verde e amônia verde podem ser produzidos a partir do hidrogênio verde. Esses combustíveis possuem algumas vantagens com relação ao hidrogênio, principalmente ligadas ao transporte e armazenamento (Carvalho et al., 2021).

O *Liquefied Natural Gas* (LNG), ou gás natural liquefeito (GNL), o *liquefied petroleum gas* (LPG) ou gás liquefeito de petróleo (GLP), são combustíveis fósseis que possuem um impacto menor nas emissões de carbono e vem sendo utilizados pela indústria marítima (ABS, 2021). Já o metanol e os biocombustíveis são combustíveis de baixo carbono que podem oferecer benefícios a médio prazo utilizando a tecnologia e infra-estruturas existentes ou sem a necessidade de grandes ajustes (ABS, 2021; MME, 2022).

Cerca de metade da tonelagem de navios encomendados em 2023 eram capazes de utilizar LNG, LPG ou metanol em motores de duplo combustível. As estatísticas demonstram um aumento do uso de metanol e LPG. Em 2023 foi também observado o surgimento dos primeiros projetos de navios movidos a amônia (DNV, 2023) e hidrogênio (BeHydro, 2023).

Existem diversas barreiras comuns à grande parte dos combustíveis neutros em carbono, como alto custo de investimento, disponibilidade limitada de combustível, ausência de infraestrutura de abastecimento, necessidade de treinamento da tripulação, elevado custo do combustível e necessidade de maior espaço de armazenamento. Além disso, o setor marítimo enfrenta a competição por alternativas de combustíveis com setores de aviação, transporte terrestre e industrial. A flexibilidade no uso de combustíveis torna-se essencial, dado que podem ocorrer oscilações significativas nos preços durante esse período (DNV, 2023).

Outras formas de energia que podem ser aplicadas à propulsão do navio são a energia eólica e solar (Serra e Fancello, 2020). Com relação à energia nuclear, são necessários avanços relacionados principalmente à redução de custos e à segurança, para que possa ser ampliada (Tay & Konovessis, 2023; Bayraktar & Pamik, 2023). Atualmente, é utilizada em Marinhas de Guerra, sendo considerada uma solução tecnicamente viável, e podendo ser uma opção competitiva, caso os custos dos reatores abaxem (DNV, 2023).

### **2.2.1.5 Pós-tratamento**

O interesse pelo sistema de CCS tem crescido como uma possível solução para reduzir as emissões de carbono no transporte marítimo (DNV, 2023). A tecnologia vem ganhando espaço, com previsão estimada em mais de 200 novas instalações terrestres no mundo até 2030, gerando uma captura de mais de 220 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>/ano, de acordo com a IEA. No entanto, uma falta de redes de transporte e locais para armazenamento de CO<sub>2</sub> começa a se tornar um obstáculo à medida que essa tecnologia avança (Machado, 2023).

Com relação a aplicação a bordo, como não é considerada nos requisitos da IMO, não há incentivos para a sua adoção (DNV, 2023). O processo para se armazenar CO<sub>2</sub> em embarcações normalmente segue quatro passos: captura,

separação, liquefação e armazenamento. Ele pode ter vários destinos, como a utilização como matéria prima na indústria, ser entregue a navios que realizam transporte nos portos, pode ser armazenado no oceano em locais próprios ou depositado no fundo do mar, e até mesmo transformado em gelo seco (Ferrer & Thomé, 2023). Surgiram também, recentemente, moléculas alternativas, como solventes de mudança de fase e líquidos iônicos, que exibem um potencial promissor (Damartzis et al. 2022). Estudos indicam que o impacto climático dependerá da quantidade de carbono capturado e armazenado de forma permanente (DNV, 2023).

### **2.2.2 Infra-estrutura portuária**

A participação das instalações portuárias na diminuição das emissões de GEE do transporte marítimo é crucial. Muitos dos avanços exigidos nas infraestruturas e estações de abastecimento já estão em andamento em diversas partes do mundo (ABS, 2021).

Atualmente, o Brasil conta com cerca de 380 terminais portuários, sendo 210 terminais de uso privado (TUP), e 170 arrendados em portos organizados, ou públicos (BNDES, 2024) que movimentaram em 2022, 1.209 bilhões de toneladas de carga (ANTAQ, 2023a). Um levantamento realizado pelo Pacto Global da ONU no Brasil aponta que nenhum porto do Brasil, dentre os avaliados, têm estrutura pronta para combustíveis alternativos. Somente dois estão construindo essas estruturas, com objetivo de receber embarcações movidas a biometano, amônia, biogás e hidrogênio verde, um deles é o Porto do Açú. O mesmo levantamento aponta que 91% dos portos avaliados não dispõem de campanhas de incentivo para redução de emissões gerados pelo transporte marítimo e cerca de 67% não possuem metas relacionadas à eficiência energética e descarbonização. Em julho de 2023, o Pacto Global da ONU no Brasil inaugurou um Comitê de Negócios Oceânicos, visando acelerar a mudança energética nos portos e na indústria naval, com o suporte do Porto do Açú. O propósito da ação é analisar as perspectivas nacional e internacional sobre a transição energética e a redução de emissões nos setores marítimo e portuário, identificando oportunidades e obstáculos específicos para o Brasil (Pacto Global, 2023).

Há um aumento no número de terminais de importação de LNG em operação no mundo nos últimos anos. No Brasil, o primeiro terminal de LNG foi inaugurado em 2008. Desde então, mais 3 terminais foram implantados no país. Ao contrário da maior parte dos países do mundo, no Brasil o LNG não tem como objetivo principal a substituição de outros combustíveis mais poluentes, mas sim o suporte à sazonalidade da geração hidrelétrica. Existem alguns projetos de terminais de LNG em estudo no Brasil, porém nenhum deles prevê inicialmente o abastecimento de embarcações (EPE, 2020).

Atualmente, a MB possui postos de abastecimento em todos os seus Distritos Navais. Com relação ao combustível são utilizados gasolina, álcool, diesel e combustível para aviação, abastecendo meios terrestres, aéreos e navais (Pereira & Moraes, 2023). Não foram localizados postos na MB com fornecimento de combustíveis alternativos.

### **2.2.3 Iniciativas governamentais voltadas para descarbonização marítima**

A falta de incentivos políticos significativos têm sido confirmada por estudos como um obstáculo para a adoção de novas tecnologias ou a implementação de combustíveis alternativos (Gössling et al., 2021). Os governos e a pesquisa podem trabalhar de forma coordenada, através de incentivos financeiros, subsídios, investimentos em tecnologias que estão em estágio inicial e políticas que facilitem

o desenvolvimento (Serra & Fancello, 2020). Alcançar a descarbonização marítima implica em custos substanciais, os quais não podem ser suportados por uma única entidade interessada, sejam armadores ou governo (DNV, 2023). Durante a COP 28, foi enfatizado que o financiamento destinado à adaptação e redução de emissões precisa aumentar consideravelmente, apontando que há capital global suficiente para preencher o déficit de investimento global. Houve também um apelo para a eliminação gradual de subsídios aos combustíveis fósseis (UNFCCC, 2023).

Além disso, há uma preocupação com os Países em desenvolvimento e pequenos Estados Insulares (UNFCCC, 2023). Nesses locais, além de incentivos econômicos, é necessário que haja uma colaboração Internacional, com compartilhamento de tecnologia e *know-how*, incentivos de capacitação e educação e treinamento da força de trabalho (Voces, 2023). Grande parte das políticas existentes partem de ações voluntárias, ou são baseadas em incentivos, principalmente nos portos (Gössling et al., 2021). As tarifas portuárias diferenciadas são o tipo de incentivo mais comum (Camargo-Díaz et al., 2022). Os portos de Suape, Itaqui, Açu e Pecém no Brasil integram o *Environmental Ship Index* (ESI), um índice adotado por mais de 50 portos em todo o mundo. Esse índice identifica navios que superam os padrões de emissão da IMO na redução de emissões atmosféricas, dando a eles uma tarifa portuária especial (MME, 2022).

No contexto do hidrogênio, por exemplo, temos a Iniciativa do Hidrogênio (H2I), uma iniciativa multinacional voluntária elaborada no contexto do quadro de energia limpa. Seu objetivo é impulsionar políticas, programas e projetos para acelerar a comercialização e implementação de tecnologias de hidrogênio e células a combustível em vários setores econômicos. Os projetos de infraestrutura para produção de hidrogênio verde normalmente tem prazos de prontificação muito longos, e portanto, é essencial que sejam desenvolvidos o quanto antes, para que estejam disponíveis até 2030 (IEA, 2023b). Já em relação aos biocombustíveis, como exemplos de políticas globais, temos a Diretiva de Energia Renovável da União Europeia, a Diretiva de Biocombustíveis dos Estados Unidos e a Parceria Global de Bioenergia, que abrangem metas para a produção e consumo, além de regulamentações sobre sua sustentabilidade e impactos ambientais (Shelare et al., 2023).

Frente às previsões de aumento populacional e do comércio global, apenas as ações técnicas e operacionais não são vistas como suficientes para alcançar uma redução substancial nas emissões de GEE originadas do transporte marítimo internacional. Nesse contexto, as Medidas Baseadas no Mercado (MBM) ganham destaque (IMO, 2024h). Os MBMs são ferramentas que usam preços de mercado para incentivar a redução de emissões (Lagouvardou et al., 2020). Os dois MBM com maior potencial para aplicação são a taxa de *bunker*, ou taxa de carbono, e o *Emissions Trading System* (ETS) global (ABS, 2021).

### 2.3 Políticas de Sustentabilidade na MB e nas Marinhas do Mundo

Em 28 de agosto de 2002, o Comandante da Marinha (CM) designou a Diretoria de Portos e Costas (DPC) como órgão encarregado da Gestão Ambiental na MB. Com isso, a DPC tem o propósito de realizar as atividades técnicas normativas e de supervisão relacionadas com a implantação e o acompanhamento do Sistema de Gestão Ambiental (SGA) da MB (BRASIL, 2024a). A DPC e os Comandos dos Distritos Navais são responsáveis pelos assuntos relativos às condutas e atividades lesivas ao meio ambiente e à prevenção da poluição ambiental por parte de embarcações, plataformas ou suas instalações de apoio (BRASIL, 2024b). O SGA busca gerir as organizações militares com o melhor relacionamento com o meio ambiente, fortalecendo a

imagem de responsabilidade ambiental da MB perante à sociedade (BRASIL, 2021).

O Livro Verde de Defesa Nacional estabelece as diretrizes para a gestão ambiental das Forças Armadas, tendo como base o princípio de ocupar o espaço sem prejudicar o meio ambiente e consumir de maneira consciente, em três áreas: uso eficiente de energia, manuseio de resíduos e substâncias e construção e manutenção de instalações militares de maneira sustentável (BRASIL, 2016b). Já o Livro Branco sobre a Defesa Nacional (LBDN) destaca que crises ambientais têm o potencial de afetar a paz e a segurança do país, evidenciando a necessidade de cooperação global em questões ambientais e sustentabilidade (BRASIL, 2020a). As questões ambientais também são destacadas na Política Nacional de Defesa (PND) e na Estratégia Nacional de Defesa (END) que em seu item 2.2.8 ressalta a necessidade do Brasil possuir condições de diversificar sua matriz de transporte, sua matriz energética e obter a autossuficiência das tecnologias necessárias para o pleno aproveitamento do seu potencial nuclear, hidrelétrico, solar, eólico e fóssil, dentre outros (BRASIL, 2020b).

De acordo com a Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM), concluída em Montego Bay, Jamaica, em 10 de dezembro de 1982, artigo 236, à proteção e preservação do meio marinho não se aplicam a navios de guerra, embarcações auxiliares, outras embarcações ou aeronaves pertencentes ou operadas por um Estado (CNUDM, 1995). Com isso, os navios de guerra, devido à imunidade soberana atribuída a eles, são exceções às principais Convenções como a CNUDM e a Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL 73/78). Porém, como representantes do Poder Naval, é importante que os navios de guerra se alinhem com as diversas vertentes ambientais (Almeida e Souza, 2022).

Em 24 de janeiro de 2024, a bordo do Navio de Pesquisa Hidroceanográfico Vital de Oliveira, da MB, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) lançou o BNDES AZUL, um novo pacote de investimentos para impulsionar a economia azul. O presidente do BNDES ressaltou a liderança da MB na construção naval e frisou que toda a pesquisa nuclear no Brasil foi feita a partir da MB, destacando a importância da integração do meio marítimo com a sustentabilidade ambiental e climática (Mendonça, 2024).

As soluções para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> a bordo de embarcações militares devem, além ter uma eficiência nas reduções, atender à algumas condições, como ter compatibilidade técnica com as demandas energéticas de bordo, e preferencialmente não exigir grandes espaços para equipamentos ou não modificar parâmetros de navegação (Coşofreţ & Avram, 2020). Nos Estados Unidos da América (EUA), a Marinha e o Corpo de Fuzileiros Navais dos EUA lançaram em 2022 sua estratégia climática, denominada de Ação Climática 2030. As metas e objetivos incluem a redução de emissões e a redução da demanda de energia (USN, 2022). Além disso, desde 2011, a Marinha dos EUA tem conduzido testes com biodiesel (Coşofreţ & Avram, 2020).

A propulsão nuclear tem sido usada pelas marinhas dos EUA, britânica, russa, francesa e chinesa há décadas, especialmente em submarinos. Navios de combate movidos a energia nuclear foram construídos pela Marinha dos EUA a partir de 1960, mas foram desativados a partir de 1990, pois os custos de aplicação de energia nuclear eram muito altos para navios de superfície menores que um porta-aviões (DNV, 2022).

Ao avaliar a aplicabilidade de um combustível para o setor de guerra naval, é essencial considerar diversos fatores, como a missão que a embarcação pode desempenhar, sua capacidade de carga, o número de dias no mar, o alcance limitado e a demanda de energia para sistemas elétricos, como radares e armamentos. A necessidade de aumentar a flexibilidade operacional é um

motivador para a utilização de um combustível alternativo na Marinha (DNV, 2022).

Uma pesquisa com a marinha de 12 países foi conduzida para identificar tendências de pensamento e opinião. Foram relatadas a utilização de algumas tecnologias alternativas para redução de emissões (DNV, 2022; USN, 2022). A Tabela 1 demonstra a quantidade de navios, por tipo de navio, utilizando tecnologias de baixo carbono nas Marinhas do mundo, com o tipo de tecnologia e o status do navio. São considerados navios de apoio os que não são projetados para participar de combate e geralmente não estão armados como, por exemplo, rebocadores oceânicos e navios de pesquisa. Os submarinos não foram abordados na Tabela 1, porém a pesquisa indica que os mesmos operam com energia nuclear ou células a combustível movidas a hidrogênio ou bioetanol. Os navios utilizam tecnologias como biocombustível, hidrogênio em células a combustível, energia nuclear, propulsão elétrica com bateria e propulsão híbrida (elétrica e mecânica) (DNV, 2022).

Tabela 1: Navios das marinhas mundiais utilizando tecnologias de baixo carbono.

Tipo de navio	País	Quantidade	Tecnologias	Status
Navio de apoio	Suécia	1	hidrogênio	em estudo de viabilidade
	Itália	1	hidrogênio	em aquisição
	Turquia	1	bateria	em aquisição
	China	1	bateria	operativo
	EUA	2	biocombustível	operativo
Navio de combate	EUA	2	hidrogênio	em estudo de viabilidade
		1	bateria	em aquisição
		1	biocombustível	operativo
Porta aviões	EUA	11	nuclear	operativos
	França	1	nuclear	operativo
Guerra anfíbia	EUA	1	biocombustível	operativo
		1	híbrido (elétrico e mecânico)	operativo
Guarda costeira	EUA	1	hidrogênio	operativo

Fonte: Adaptado de DNV (2022); USN (2022); Lannoy & Gonçalves, (2024) e Poder Naval (2024)

A pesquisa destacou que disponibilidade de combustível, a flexibilidade para troca do mesmo, questões de segurança e compatibilidade com o navio foram questões colocadas como prioritárias para as Marinhas do mundo na hora de escolher um combustível ou tecnologia. Não foram localizados na literatura trabalhos que abordem a seleção de um conjunto de tecnologias de descarbonização ideal para um navio de guerra específico, utilizando um método MCDM, levando em consideração o contexto brasileiro. O relatório da DNV aborda a utilização de tecnologias para diferentes tipos de navios de guerra de forma mais ampla, sem a avaliação mais aprofundada de um tipo de navio específico, utilizando uma metodologia diferente, e considerando o contexto mundial (DNV, 2022). Além disso, o documento foi publicado em 2022, e dado o rápido avanço das tecnologias, é fundamental realizar uma nova avaliação que incorpore as últimas inovações e desenvolvimentos no campo da descarbonização naval.

## 2.4 Teoria da ambidestria Organizacional e a Marinha do Brasil

A ambidestria organizacional é um conceito de gestão estratégica, formado por duas componentes essenciais: exploração e aproveitamento

(Chandrasekaran et al., 2012). Na categoria de exploração estão englobados conceitos associados a atividades como busca, variação, tomada de riscos, experimentação, jogo, flexibilidade, descoberta e inovação. Já a categoria de aproveitamento compreende elementos como refinamento, escolha, produção, eficiência, seleção, implementação e execução (March, 1991). A interdependência entre a exploração e aproveitamento é crucial, pois concentrar-se exclusivamente em uma delas pode ser prejudicial para o desempenho organizacional (Chandrasekaran et al., 2012). Para aproveitar as vantagens das novas tecnologias, as empresas precisam garantir que essas tecnologias sejam viáveis no presente, utilizar suas competências já estabelecidas e, ao mesmo tempo, buscar novas oportunidades para assegurar a sustentabilidade futura (Koryak et al., 2018).

Existem três formas de ambidestria organizacional: a contextual, a sequencial e a estrutural. A ambidestria contextual oferece flexibilidade ao permitir que os funcionários tenham liberdade para equilibrar atividades de exploração e aproveitamento de recursos, possibilitando que as iniciativas exploratórias surjam de maneira espontânea. Um exemplo disso é o modelo adotado pela Google, onde os engenheiros dispõem de 20% de seu tempo para desenvolver novos projetos de sua escolha, sem a necessidade de aprovação prévia. No entanto, essa forma de ambidestria é mais eficaz quando as iniciativas exploratórias estão alinhadas com os negócios principais da organização, facilitando a integração dessas inovações no contexto já existente. Já a ambidestria sequencial promove a separação temporal entre as atividades de exploração e aproveitamento. Nessa abordagem, a organização se dedica exclusivamente ao aproveitamento em determinados períodos e, em outros, à exploração, permitindo um foco completo em cada atividade. Esse modelo pode ser eficaz no nível de projeto, onde a transição é mais simples. Contudo, no nível organizacional, a ambidestria sequencial apresenta desafios. A necessidade de alternar entre exploração e aproveitamento exige reconfigurações frequentes de estratégias, estruturas e processos, gerando possíveis ineficiências.

A ambidestria estrutural é considerada a abordagem mais promissora e prática para implementar a ambidestria organizacional, pois separa as atividades de exploração e aproveitamento em diferentes unidades organizacionais, cada uma sob a coordenação de um executivo sênior. Isso permite que as unidades se concentrem em negócios e estratégias distintas: algumas focadas na melhoria de produtos e processos existentes, enquanto outras se dedicam à exploração de novos mercados e tecnologias. No entanto, essa abordagem tem como desvantagem a sobrecarga de trabalho sobre os executivos sêniores, que precisam coordenar múltiplas unidades com diferentes demandas. Nesse contexto, surgiu também o conceito de ambidestria dinâmica, que consiste em aplicar as três formas de ambidestria existentes em níveis organizacionais diferentes (Chen, 2017).

A MB é uma Instituição composta por diversas Organizações Militares. Para que suas organizações tenham sucesso, é importante que consigam manter a ambidestria, integrando a componente exploratória, como a adoção de novas tecnologias para reduzir as emissões de carbono de seus navios, quanto a componente de aproveitamento, com a necessidade de manter e aprimorar suas capacidades existentes. Essa abordagem permite que a Marinha seja não apenas operativa e eficiente, mas também capaz de explorar e aplicar inovações necessárias ao setor naval, alinhando-se com a teoria da ambidestria organizacional.

A ambidestria organizacional aplicada à MB é do tipo estrutural. A Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha (DGDNTM) é a organização militar responsável pela componente de exploração. Criada pelo Decreto nº 8.900, de 10 de novembro de 2016, a DGDNTM consolidou as

atividades do Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB) e do Programa Nuclear da Marinha (PNM), além de incorporar as Estruturas Organizacionais de Gestão de Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I) da MB. O principal objetivo de sua criação foi integrar, racionalizar e facilitar a interlocução, além de aumentar a visibilidade das iniciativas estratégicas. Esse processo incluiu a elaboração de uma estratégia de CT&I para a Marinha. Subordinado à DGDNTM, o Centro Tecnológico da Marinha no Rio de Janeiro (CTMRJ) foi criado no mesmo ano, e é dedicado a atividades não nucleares e reúne Instituições de Ciência e Tecnologia (ICT), com o objetivo de unificar a gestão administrativa e de CT&I dessas instituições (BRASIL, 2024c)

## 2.5 Técnicas para seleção de tecnologias de descarbonização

A seleção de tecnologias de descarbonização para aplicações marítimas é um processo complexo de tomada de decisão que envolve múltiplos critérios e partes interessadas. À medida que a indústria naval avança em direção à descarbonização, a escolha dessas tecnologias torna-se crucial. Esta Seção explora a visão geral das técnicas de tomada de decisão utilizadas para escolher tecnologias de descarbonização, com foco particular nos métodos de MCDM e sua aplicação na seleção de tecnologias.

A decisão de adotar tecnologias para descarbonização no setor marítimo envolve a consideração de vários fatores, como por exemplo impacto ambiental, viabilidade econômica, viabilidade técnica. As abordagens tradicionais de tomada de decisão frequentemente se baseiam em métodos de critério único, tipicamente análise de custo-benefício. No entanto, esses métodos podem não capturar completamente a natureza multifacetada de tecnologias sustentáveis (Diaz-Baleiro et al., 2017).

Nesse contexto, técnicas mais abrangentes surgiram para abordar essa complexidade. Entre estas, podemos exemplificar:

**Avaliação do Ciclo de Vida (ACV):** Este método avalia os impactos ambientais de uma tecnologia ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a produção até o uso final (Ingrao et al., 2018).

**Análise Técnico-Econômica (TEA):** Esta abordagem combina avaliação de desempenho técnico com avaliação econômica para determinar a viabilidade e potencial rentabilidade de diferentes opções de tecnologias de descarbonização (Kheirnik et al., 2021)

**Métodos MCDM:** Permitem que os tomadores de decisão avaliem sistematicamente múltiplas alternativas com base em vários critérios, muitas vezes conflitantes (Luciana et al., 2021).

Entre essas técnicas, o MCDM ganhou atenção significativa devido à sua capacidade de lidar com a natureza multidimensional da seleção de tecnologias de descarbonização. Os métodos MCDM fornecem uma abordagem estruturada para processos complexos de tomada de decisão, onde múltiplos critérios, frequentemente conflitantes, precisam ser considerados simultaneamente. Esses métodos são particularmente úteis no contexto da seleção de tecnologias de descarbonização, onde fatores ambientais, econômicos e técnicos devem ser equilibrados (Strantzali et al., 2023).

A depender do tipo de problema (seleção, ordenação, classificação, etc.), há diversos métodos MCDM que podem ser utilizados. É comum a utilização de uma abordagem híbrida, com um método para alocação de pesos para os critérios e outro método para o apoio à decisão em si (Abdel-Basset et al., 2021). Neste contexto, o método mais utilizado para alocação de pesos com o auxílio de especialistas é o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), devido à sua facilidade de implementação e explicabilidade (Diaz-Baleiro et al., 2017). A agregação da opinião de mais de um especialista no método AHP pode ser feita em um dos dois

níveis principais: *Aggregating individual judgments* (AIJ) ou *Aggregating individual priorities* (AIP). No AIJ, Agregação de Julgamentos Individuais, o processo envolve primeiro combinar as matrizes de comparação fornecidas por cada especialista em uma matriz de julgamento única, representando o grupo como um todo. Em seguida, a partir dessa matriz agregada, o vetor de decisão do grupo é calculado. Já no AIP, ou Agregação de Prioridades Individuais, o cálculo dos pesos de cada especialista é realizado separadamente, gerando vetores individuais de decisão. Esses vetores são, então, combinados para formar o vetor de decisão final do grupo (Bernasconi et al., 2014). Para o método AIJ a média geométrica deve ser utilizada na agregação. Já no método AIP a média aritmética ou geométrica podem ser utilizadas para agregar as prioridades dos indivíduos (Forman & Peniwati, 1998).

Dentre os métodos para o processo de decisão em si, métodos baseados em distância, como o *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) são adequados em situações onde há um conjunto bem definido de alternativas, em que os atributos são quantificáveis (diretamente ou com auxílio de especialistas), por permitirem uma solução de compromisso, isto é, uma solução factível e o mais próxima possível da ideal (Behzadian et al.2012).

As técnicas de MCDM são amplamente utilizadas em diversos contextos para a seleção de tecnologias de descarbonização, como combustíveis alternativos. Em um exemplo, Ren et al. (2020) utilizaram o Fuzzy Best-Worst Method (FBWM) e o fuzzy TOPSIS para classificar a sustentabilidade de diferentes tecnologias de produção de hidrogênio. Akbas & Bilgen (2017) propuseram uma estrutura integrada de Fuzzy Quality Function Deployment (FQFD) e um algoritmo de seleção TOPSIS para escolher o gás combustível ideal em estações de tratamento de águas residuais. No setor de transporte marítimo, Alam et al. (2021) utilizaram o AHP e o TOPSIS para auxiliar na tomada de decisões sobre combustíveis alternativos adequados.



### 3 Procedimentos Metodológicos

Este capítulo apresenta os métodos utilizados no presente trabalho. A metodologia do trabalho é composta por uma Revisão da literatura e Estudo de caso único exploratório. A utilização de uma abordagem multi-metodológica aumenta a confiabilidade do estudo, uma vez que a Revisão da Literatura será utilizada como embasamento para o Estudo de Caso, influenciando a elaboração de protocolos e análise de resultados.

#### 3.1 Revisão da Literatura

Nessa etapa, foi realizada uma revisão da literatura, seguindo os 8 passos de Thomé et. al (2016), conforme a seguir:

**Passo 1** - planejamento e formulação do problema:

O tema de pesquisa foi definido, com sua respectiva motivação e perguntas de pesquisa.

**Passo 2** - pesquisa na literatura:

Uma análise comparativa das três bases de dados revelou que as plataformas *Web of Science* e *Scopus* concentram a maior parte de sua abrangência nas disciplinas das Ciências da Vida, Ciências Físicas e Tecnologia, enquanto a plataforma *Dimensions* demonstrou possuir uma cobertura consideravelmente mais abrangente nas áreas das Ciências Sociais e Artes e Humanidades (Singh et al., 2021). Em virtude do tema de descarbonização marítima se enquadrar na disciplina Ciências Físicas e Tecnologia, e devido a abrangência e volume de estudos encontrados nas bases *Scopus* e *Web of Science*, demonstrados na Tabela 2, ambas foram selecionadas para realização da pesquisa.

Tabela 2: Bases de dados selecionadas.

Base de dados	Justificativa
<i>Scopus</i>	Plataforma de pesquisa que combina de forma única um banco de dados abrangente de resumos e citações. Possui mais de 1,8 bilhões de referências citadas desde 1970, mais de 84 milhões de registros e 17,6 milhões de perfis de autores. O Scopus inclui publicações principalmente nas seguintes áreas: Ciências Sociais, Ciências Físicas, Ciências da Saúde e Ciências da Vida.
<i>Web of Science</i>	Plataforma de pesquisa que localiza conjuntos de dados, artigos de conferências, livros, preprints e patentes, juntamente com conteúdo dos principais periódicos do mundo em várias disciplinas e países. Possui mais de 2,2 bilhões de referências citadas, 196 milhões de registros abrangendo 1.864 periódicos e 254 categorias de assuntos.

Fonte: *Scopus* (2024) e *Web of Science* (2024).

Como base para a pesquisa, dado a quantidade de artigos disponíveis sobre o tema, foi realizada uma revisão terciária da literatura. Uma revisão de literatura utiliza pesquisas primárias ou originais como base de dados, não realizando novas pesquisas primárias (Cooper, 1988), ou seja, é um estudo secundário da literatura. Uma revisão terciária, ou estudo terciário, consiste na análise de estudos secundários que abordam as mesmas questões de pesquisa (Keele, 2007). Para a revisão terciária, foram realizadas duas pesquisas. A primeira pesquisa utilizou termos de pesquisa para cobrir os componentes do estudo referentes a "descarbonização", "navio" e "revisão da literatura". Durante a avaliação do resultado, foi identificada a necessidade de abranger a pesquisa para obter uma visão completa do tópico em estudo, aumentando a confiabilidade e validade dos resultados. Dessa forma, uma segunda pesquisa foi realizada, utilizando novamente os termos para os componentes "descarbonização" e "navio", porém

retirando o componente "revisão da literatura" e selecionando "artigos de revisão", como filtro. A Tabela 3 demonstra os componentes de cada pesquisa, com suas respectivas *Keywords*, além dos critérios de inclusão e exclusão utilizados. Foram considerados apenas documentos publicados em revistas científicas revisadas por pares, e selecionados artigos de todos os anos, o que correspondeu a um período entre 2002 e março de 2024.

Tabela 3: Componentes da pesquisa nas bases de dados eletrônica.

Pesquisa 1	
Componentes/Critério	Palavras-chave/ Filtro
Descarbonização	"decarboni"OR"emission control"OR"emission reduction"OR"emission mitigation"
Navio	"ship"*OR"vessel*"
Revisão da literatura	"literature review"
Primeiro critério de inclusão/exclusão	Selecionados: Artigos e artigos de revisão Linguagem: Inglês
Pesquisa 2	
Components/Criteria	Palavras-chave/ Filtro
Descarbonização	"decarboni"OR"emission control"OR"emission reduction"OR"emission mitigation"
Navio	"ship"*OR"vessel*"
Primary inclusion/exclusion criteria	Selecionados: artigos de revisão Linguagem: Inglês

### **Passo 3:** Coleta de dados

Os dados foram coletados e os artigos duplicados foram excluídos utilizando ferramentas da linguagem de programação R no *RStudio*. Os resultados foram exportados para uma planilha para serem analisados.

### **Passo 4:** Avaliação da qualidade

Os estudos foram analisados pelo título e *abstract*. Para a revisão terciária da literatura, como critérios de inclusão secundários, foram incluídos artigos de revisão, que citassem o tema de descarbonização ou redução de emissões de carbono e que explicitamente indicassem a aplicação em meios de transporte marítimos. Como critérios de exclusão, não foram incluídos estudos que não cumprissem os critérios de inclusão secundários. Nesse caso, também foram excluídos artigos que citam apenas outras formas de redução de emissão, como por exemplo de SOX e NOX, e artigos sobre redução de emissões em portos, que não citassem especificamente descarbonização em navios. A análise da descarbonização em portos é recomendada para estudos futuros. Optou-se por manter todas as revisões encontradas, ainda que não sistemáticas ou sem metodologias bem definidas, para possibilitar uma visão mais abrangente sobre o tópico.

**Passos 5, 6 e 7:** Análise e síntese dos dados, interpretação e apresentação de resultado

Os resultados e discussões são apresentados na seção 4, que foi dividida em subseções. A subseção 4.1 apresenta os resultados da revisão da literatura, a subseção 4.2 os resultados do estudo de caso e a subseção 4.3 as discussões.

### **Passo 8:** Atualizando a revisão

Esse passo não encontra-se no escopo do estudo, por não se tratar de uma atualização de revisões prévias.

A Figura 5 apresenta os procedimentos dos passos de 1 a 4, e os respectivos resultados numéricos em quantidade de artigos, seguindo o protocolo *Preferred Reporting Items for SLR and Meta-Analyses* (PRISMA).

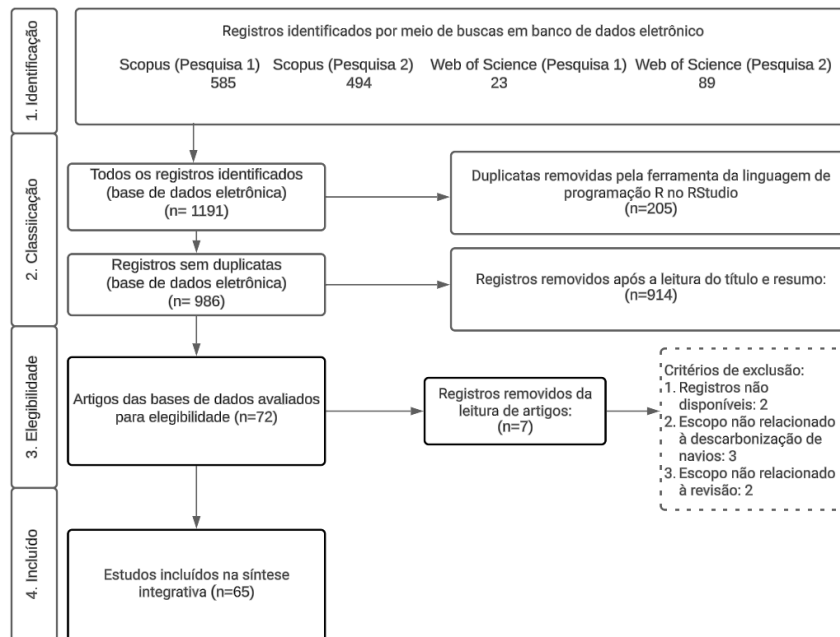


Figura 5: Protocolo PRISMA.  
 Fonte: Adaptado de Moher et al. (2009).

Devido à natureza contemporânea do tema, como complementação da literatura acadêmica, fontes de literatura cinza, incluindo websites confiáveis como, por exemplo, o site oficial da IMO e da *International Renewable Energy Agency* (IRENA), foram incorporadas para identificar as mais recentes aplicações na indústria naval. Foi utilizado o método de bola de neve, que consiste em estender a busca a partir das referências citadas nos relatórios da IMO e da IRENA.

### 3.2 Estudo de caso único

Segundo Yin (2018), a abordagem de estudos de caso únicos e exploratórios proporciona uma oportunidade para investigar detalhadamente um cenário específico, mantendo uma visão completa e realista. Isso é realizado por meio de várias fontes de dados: observação direta dos eventos em questão, análise de documentos, pesquisa em bancos de dados, análise de artefatos físicos e entrevistas com pessoas possivelmente envolvidas nas situações em estudo. É possível estudar as questões relacionadas ao fenômeno, para que seja gerada uma explicação convincente ou identificada uma relação de causa e efeito entre os fatores iniciais e os resultados (Benbasat et al., 1987).

Um estudo de caso aborda uma situação tecnicamente única, onde há uma quantidade de variáveis de interesse em relação aos pontos de dados disponíveis. Além disso, aproveita-se do prévio desenvolvimento de proposições teóricas para direcionar o planejamento, coleta de dados e análise (Yin, 2018), e fundamenta-se na utilização de diversas fontes de evidência, procurando uma convergência de dados de maneira triangular, a fim de aumentar sua validade (Voss et al., 2010, Yin, 2018).

Os estudos de caso incluem tanto casos únicos, quanto múltiplos (McCutcheon & Meredith, 1993). Apesar da preocupação quanto a generalização a partir de um estudo de caso único, Yin (2018) argumenta que o estudo de caso único normalmente busca resultados generalizáveis ou lições aplicáveis que vão além da situação específica estudada, criando generalizações analíticas. As proposições geradas inicialmente fornecem a base para essas generalizações,

que podem ser corroboradas, modificadas ou rejeitadas com base nas descobertas do estudo.

Segundo Sammartino (2002) não é apenas o estudo de caso que pode gerar vieses, sendo passível de ocorrer em qualquer outro método de investigação científica. Para que vieses sejam evitados, é necessário verificar a qualidade do estudo de caso, o que pode ser feito através de testes lógicos. Quatro testes podem ser conduzidos, e algumas táticas são eficazes para abordar cada um deles. Esses testes são: validade de construto, validade interna, validade externa e confiabilidade. O teste lógico de validade de construto identifica as medidas operacionais apropriadas para o estudo de caso, buscando prevenir críticas que possam impactar a qualidade do trabalho. As táticas incluem o uso de múltiplas fontes de evidência e de informantes-chave para revisar o relatório do estudo de caso. Já a validade interna, é uma preocupação principalmente para estudos de caso explicativos. Nesse caso, uma tática para alcançar a qualidade é utilizar a correspondência de padrões, ou seja, comparar um padrão observado empiricamente no estudo de caso, com um padrão previsto anteriormente, antes da aplicação do referido estudo (Yin, 2018). A validade externa tem como objetivo demonstrar se as conclusões de um estudo de caso podem ser generalizadas, e de que maneira. Nesse caso, a tática para aumentar a qualidade do estudo, em estudos de caso únicos, é usar teorias ou proposições teóricas. As proposições teóricas possuem um papel essencial na formulação do desenho de pesquisa, servindo de orientação para a coleta de dados e estratégias de análise. Ao serem empiricamente reforçadas pelas descobertas do estudo de caso, essas proposições formam a base para generalizações analíticas. O teste lógico de confiabilidade busca demonstrar que as etapas de um estudo, incluindo a coleta de dados, podem ser repetidas com resultados consistentes. É essencial documentar os procedimentos adotados no estudo de caso, e para isso, duas estratégias são recomendadas: a implementação de um protocolo de estudo de caso e a criação de um banco de dados do estudo (Yin, 2018). A Tabela 4 apresenta os testes lógicos e as táticas aplicadas neste estudo para melhorar a qualidade e prevenir possíveis vieses.

Tabela 4: Táticas para testes lógicos do estudo de caso.

Teste Lógico	Tática
Validade de Construto	Utilização de pesquisa triangulada, com múltiplas fontes de evidência, como: documentações, entrevistas, observações diretas e artefatos físicos.  Revisão do relatório do estudo de caso por informantes-chaves.
Validade Interna	Utilização de correspondência de padrões, comparando evidências de aplicações do "mundo real" com resultados do estudo de caso.
Validade Externa	Utilização de proposições teóricas.
Confiabilidade	Utilização de um protocolo de estudo de caso.  Desenvolvimento de um banco de dados.

Fonte: Adaptada de Yin, 2018.

A metodologia do estudo de caso permite explorar diversas perspectivas e interpretações, oferecendo descobertas complementares sob várias óticas. O foco está em capturar as visões dos participantes, destacando como suas interpretações individuais contribuem para uma compreensão mais completa do tema em análise. A utilização do estudo de caso único é uma estratégia apropriada em várias situações, com cinco justificativas distintas para a escolha da unidade de análise: caráter crítico, incomum, comum, caso revelador ou longitudinal. Os estudos de caso também podem ser classificados como holísticos, quando tratam

da análise em um nível, ou incorporados, quando envolve análise de subunidades dentro do caso (Yin, 2018). Para o trabalho dessa dissertação, a MB foi escolhida e para estudo de caso único exploratório foi escolhido um tipo de Navio de Guerra. Por se tratar de um Navio de Guerra, o estudo de caso tem caráter incomum, quando comparado a navios comerciais, pois possuem equipamentos específicos, como canhões e metralhadoras, que podem influenciar nas seleções de tecnologias mais compatíveis, assim como necessidades operacionais inerentes ao meio militar. Ao mesmo tempo, dentro da MB, pode ser considerado como um caráter comum, com o estudo podendo ser expandido para outras classes de navios semelhantes. O estudo é do tipo holístico, uma vez que não serão avaliadas subunidades.

O estudo de caso seguiu os seguintes passos, adaptados de Freitas & Jabbour (2011):

I- Contato formal com a organização e explanação dos objetivos do estudo

Realização de contato com a MB, por meio da Diretoria Industrial da Marinha, organização responsável pela aprovação e acompanhamento de Cursos de pós-graduação a nível de mestrado na área de Engenharia de Produção. Apresentação do projeto e seus objetivos ao setor responsável, a fim de verificar a possibilidade de execução, coleta de dados e possibilidade de realização de entrevistas com técnicos e engenheiros da Instituição.

II - Seleção do Objeto de estudo e dos especialistas a serem entrevistados

Seleção do tipo de Navio de Guerra a ser utilizado como estudo de caso e de especialistas com conhecimentos em construção naval, instalação de equipamentos e estudos técnicos de viabilidades tecnológicas voltadas para navio de guerra, para a fase de entrevistas e validação do estudo. Os especialistas para apresentação e seleção das tecnologias foram selecionados em Organizações Militares (OM) da MB que atuam nessas áreas.

III - Definição de critérios para acesso à organização e aos documentos, quais são confidenciais e quais podem ser divulgados

Nessa etapa, é verificada a permissão para acesso à Organização e à documentos, bem como a divulgação de dados técnicos e de especialistas.

IV- Seleção de tecnologias a partir da Revisão da Literatura

Seleção de tecnologias que podem ser aplicadas ao modelo de Navio de Guerra selecionado para estudo de caso, para serem apresentadas e avaliadas quanto à aplicabilidade por especialistas da MB.

V- Coleta das evidências

Nessa etapa, segundo Yin (2018), os instrumentos a serem utilizados são: entrevistas, consulta a arquivos e análises de documentos, observação, conversas informais e artefatos físicos. A utilização da triangulação, que consiste na aplicação de diversas fontes de evidências, é crucial, possibilitando que os achados ou conclusões de um estudo de caso sejam mais convincentes e precisos, convergindo para resultados semelhantes. Para a etapa de entrevistas, serão apresentadas aos entrevistados as tecnologias selecionadas de acordo com o item IV, e os arquivos e documentos do navio a ser analisado.

VI - Análise dos dados e publicação

Nessa etapa foram aplicados métodos de análise-multicritério para definição do peso dos critérios e seleção das tecnologias. Esses métodos são denominados MCDM, que vem sendo utilizado por pesquisadores e profissionais para avaliação e classificação de alternativas nos mais diversos setores (Behzadian et al., 2012). O propósito de um método MCDM é auxiliar no processo decisório, recomendando ações ou direções a serem tomadas pelo responsável pela decisão. A análise decisória implica na escolha das alternativas mais adequadas, levando em conta os objetivos e preferências do tomador de decisão. Os problemas de MCDM têm três componentes principais: tomadores de decisão, alternativas e critérios. As alternativas podem ser identificadas ou desenvolvidas, e o conjunto de alternativas

forma o espaço de decisão. Os critérios são os requisitos que cada alternativa deve possuir em um grau maior ou menor. As alternativas são comumente analisadas de acordo com uma avaliação em relação aos critérios estabelecidos, considerando os objetivos e preferências do tomador de decisão (Zarghami et al, 2011).

Os critérios, baseados na literatura, foram definidos e apresentados na seção 4.2.6. Para determinação dos pesos dos critérios da propulsão e dos combustíveis foi utilizado o método MCDM AHP. No método AHP o tomador de decisão utiliza do seu julgamento, através de uma escala, para realizar uma comparação entre pares, definindo prioridades e classificando as alternativas. A escala fundamental para comparação entre os pares de critérios é demonstrada na Tabela 5 (Saaty, 1980). Dois especialistas da área gerencial da MB foram selecionados como decisores, e a agregação dos pesos foi realizada pelo método AIJ utilizando a média geométrica (Vaidya & Kumar, 2006). A média geométrica no método AIJ satisfaz o requisito de reciprocidade, permitindo uma agregação sinérgica dos julgamentos individuais. Dessa forma, o grupo de especialistas é tratado como um único 'indivíduo', e as preferências do grupo refletem essa unidade (Forman & Peniwati, 1998). Um teste de consistência é aplicado para verificar a opinião dos decisores (Ratnayake et al., 2022). As etapas e fórmulas do método podem ser observadas no APÊNDICE A: MÉTODO AHP - TOPSIS. Para facilitar o cálculo, o método foi calculado utilizando linguagem de programação R no *software RStudio*.

Tabela 5: Escala Fundamental.

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	igual importância	as duas atividades contribuem da mesma forma para o objetivo
3	importância moderada	experiência e julgamento favorecem ligeiramente uma atividade em detrimento de outra
5	importância forte	experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade em detrimento de outra
7	importância muito forte	uma atividade é fortemente favorecida em detrimento de outra
9	importância extrema	a evidência que favorece uma atividade em detrimento de outra é da mais alta ordem possível
2,4,6 e 8	valores intermediários	-

Fonte: Adaptado de Saaty (1980)

Para ranqueamento das soluções de propulsão e de combustível, e consequentemente escolha da solução ideal, foi utilizado o método MCDM denominado *Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS). O método TOPSIS padrão tenta escolher alternativas que tenham simultaneamente a menor distância da solução ideal positiva e a maior distância da solução ideal negativa. A solução ideal positiva maximiza os critérios de benefício e minimiza os critérios de custo, enquanto a solução ideal negativa maximiza os critérios de custo e minimiza os critérios de benefício (Behzadian et al., 2012). Quatro especialistas da Marinha do Brasil, com conhecimentos técnicos sobre navios de guerra, foram selecionados para preencher uma matriz de decisão, atribuindo pontuações a cada alternativa em relação a diversos critérios. Utilizou-se a escala *Likert* de 5 pontos, onde 1 representa a pior avaliação e 5 a melhor. A escala *Likert* é amplamente reconhecida por sua facilidade e confiabilidade na medição de percepções, a versão de 5 pontos é a mais amplamente utilizada, mapeando as escolhas dos entrevistados em cinco opções claras (Tanujaya et al., 2022). Todos os critérios foram considerados critérios de benefício. Os pesos utilizados no método foram os obtidos pelo método AHP, tanto para a propulsão, quanto para combustível. As etapas e fórmulas do método

---

TOPSIS são demonstradas no APÊNDICE A: MÉTODO AHP - TOPSIS. Para facilitar o cálculo, o método foi calculado utilizando linguagem de programação R no *software RStudio*.

VII- Devolução aos respondentes/organização para validação ou não das evidências coletadas.

O resultado final dos resultados obtidos no passo VI foram apresentados aos especialistas, em reunião conjunta, para validação.

## 4 Resultados e discussões

Neste capítulo, são apresentados os resultados da revisão da literatura, o resultado do estudo de caso e as discussões sobre os resultados.

### 4.1 Resultado da revisão da literatura

Os 65 artigos selecionados para a revisão terciária da literatura foram analisados em ferramentas da linguagem de programação R e por planilhas no excel. As revisões selecionadas foram desenvolvidas com base em um total de pelo menos 5.508 artigos. Este número inclui tanto as revisões que especificaram essa informação quanto aquelas que não a mencionaram, sendo estas últimas contabilizadas a partir das referências citadas.

A Figura 6 demonstra a quantidade de artigos de revisão por país. Os países que lideram as revisões sobre esse tópico são China, seguida do Reino Unido, demonstrando que esses países têm desempenhado um papel significativo na produção de conhecimento e na condução de pesquisas sobre descarbonização marítima. As fontes que mais publicaram revisões sobre o tema, de um total de 39 fontes distintas, são "*Energies*" e "*Sustainability (Switzerland)*", com 8 e 6 revisões, respectivamente, o que evidencia um claro interesse dessas fontes pelo tema. A quantidade de revisões publicadas em cada ano é demonstrada na Figura 7. Observa-se um aumento acentuado a partir de 2018, com o volume de pesquisas atingindo seu ponto mais alto em 2022. Esse crescimento pode estar diretamente relacionado à estratégia inicial da IMO adotada em 2018, que estabeleceu metas para a redução das emissões de GEE no setor marítimo. A taxa de crescimento anual de revisões da literatura é de 13,43 %, o que indica um crescimento significativo do interesse pelo tema ao longo dos anos, especialmente após 2019.

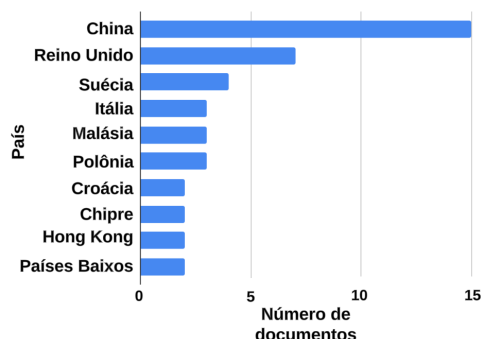


Figura 6: Países mais produtivos.

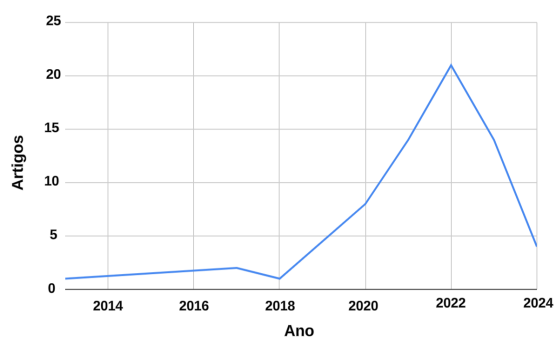


Figura 7: Produção Científica anual

Os artigos selecionados foram agrupados de forma indutiva em cinco temas principais, identificados a partir das análises realizadas: "combustíveis e fontes alternativas de energia", "potência e propulsão", "política e regulamentação", "modelagem e análise de dados", e "revisões abrangentes". No tema de "revisões abrangentes", foram incorporados os artigos que abordaram de maneira significativa conteúdos relacionados a mais de um dos outros quatro temas. Na Figura 8 é demonstrado o percentual de revisões de cada tema.



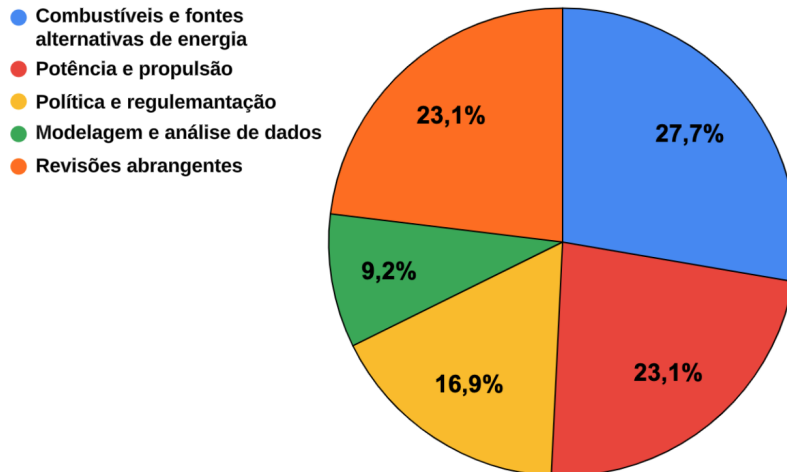


Figura 8: Percentual de revisões por tema.

Os temas mais relevantes são "combustíveis e fontes alternativas de energia", com 27,7%, seguido de "revisões abrangentes" e "potência e propulsão", ambos com 23,1%. Considerando que os artigos agrupados em "revisões abrangentes" geralmente abordam estudos sobre combustíveis alternativos e propulsão, fica evidente que os temas "combustíveis e fontes alternativas de energia" e "potência e propulsão" se destacam em relação aos demais. As revisões que compõem os grupos "política e regulamentação" e "modelagem e análise de dados" foram consideradas para referencial teórico e como informações adicionais. Esses documentos servem não apenas como suporte, mas também como fonte motivadora para a implementação de práticas e tecnologias mais sustentáveis.

A partir das revisões que compõem os grupos "combustíveis e fontes alternativas de energia", "potência e propulsão" e "revisões abrangentes", além da literatura cinza e fontes obtidas pelo método bola de neve, foram identificadas as tecnologias referentes ao maquinário e energia, para que ao final, formassem soluções tecnológicas para o estudo de caso. Portanto, as seções subsequentes destacarão os resultados e discussões relacionados a esses dois tipos de tecnologias, que se mostram viáveis como parte das soluções para o problema em questão.

Nesta seção são revisados os módulos de geração de energia (Subseção 4.1.1). Os módulos de energias renováveis, embora também gerem energia, serão tratados em subseção à parte (Subseção 4.1.2) para um melhor entendimento do texto. As tecnologias renováveis, embora sejam tipicamente categorizadas como energia, foram discutidas nesta dissertação dentro do contexto dos "Módulos de geração de energia", porque são opções relevantes para a propulsão e geração de energia. Esta Subseção é seguida dos módulos de armazenamento de energia (Subseção 4.1.3), e os métodos de propulsão utilizados (Subseção 4.1.4).

A seção 4.1.5, referente a "Energia" foi subdividida de acordo com os tipos de combustíveis em Grupo A (biocombustíveis destilados que podem ser aplicados em motores diesel convencionais), Grupo B (biocombustíveis neutros em carbono formados por álcoois e gases liquefeitos) e Grupo C (combustíveis com base em hidrogênio, amônia e os eletrocombustíveis, que podem ser produzidos à partir do hidrogênio verde). Como as tecnologias e estratégias de "Logística e Digitalização", "Hidrodinâmica" e "Pós-tratamento" podem ser implementadas de forma complementar à escolha de equipamentos e fontes de energia, não serão consideradas como opções de seleção para este estudo de caso. Na seção 4.1.6,

é apresentado o panorama atual e perspectivas futuras das tecnologias de descarbonização no Brasil e no Mundo, extraídas da revisão da literatura.

#### 4.1.1 Módulos de Geração de Energia

Nesta Subseção serão discutidos os motores de combustão interna, turbinas à gás e células a combustíveis.

##### 4.1.1.1 Motores de combustão interna

Os motores de combustão interna (MCI), ou *internal combustion engine* (ICE), são os tipos de módulos de geração de energia mais utilizados pela indústria marítima, devido a maturidade tecnológica, confiabilidade e eficiência. Cerca de 98% da frota naval utiliza essa tecnologia (Mallouppas et al., 2023). O ICE funciona através de uma série fixa de eventos, onde o ciclo pode ocorrer em dois ou quatro tempos. Um "tempo" é definido pelo movimento do pistão entre seus pontos extremos. O tipo de motor mais aplicado é o ciclo diesel de dois tempos (Szklo et al., 2020). Os motores diesel modernos de alta pressão, de dois tempos e com controle eletrônico, são mais fáceis de adaptar para o uso de combustíveis alternativos sem perda de potência do que os motores de quatro tempos (ABS, 2021).

Os motores *dual fuel* podem funcionar tanto abastecidos com gás quanto com combustível líquido (Wärtsilä, 2024a). No modo a gás, os motores *dual fuel* operam com um ciclo Otto de combustão, onde uma mistura de ar e gás é pré-misturada na câmara de combustão. O gás é admitido no cilindro juntamente com o ar, quando a válvula de admissão é aberta. Em vez de uma vela de ignição, comum nos motores de ignição por centelha, a ignição da mistura é realizada pela injeção de uma pequena quantidade de combustível piloto, geralmente diesel, na câmara de combustão. Essa fonte de alta energia garante uma ignição confiável e forte da mistura. No modo diesel, de acordo com o conceito normal do motor diesel, o motor usa o sistema tradicional de injeção, onde o combustível é injetado em alta pressão na câmara de combustão. A admissão de gás é desativada, mas o combustível piloto permanece ativado para garantir uma ignição estável quando o motor é alternado para operação a gás. Um exemplo desse motor, é o motor *dual fuel* movido a LNG. Já um exemplo de motor *dual fuel* que utiliza combustíveis líquidos é o motor que opera com metanol. Devido ao baixo número de cetano do metanol, é necessário utilizar um combustível piloto para garantir a ignição adequada, o que torna essencial o uso de um motor *dual fuel*. Esses motores geralmente são equipados com bombas que fornecem alta pressão ao metanol, assegurando uma alimentação adequada e eficiente do combustível (Wei, 2021).

O uso de motores *dual fuel* tem facilitado a transição para combustíveis de baixo ou zero carbono, tornando esse processo mais viável em comparação com o passado recente (ABS, 2021). Entre as principais tendências de curto prazo, destacam-se os motores *dual fuel* movidos a LNG, LPG e metanol (Wang et al., 2024).

Diversos fabricantes de motores têm realizado pesquisas e experimentos visando a aplicação de biocombustíveis em motores convencionais. Por exemplo, testes com misturas utilizando 30% de biodiesel (B30) no diesel fóssil demonstraram que não foram geradas alterações nos motores. Embora avanços estejam ocorrendo, ainda há a necessidade de um maior desenvolvimento e ajustes nessa área (CEBRI, 2023).

Além dos motores, é essencial levar em consideração os tanques de combustível necessários. Isso é válido também ao se utilizar turbina a gás ou células a combustível. Projetar sistemas de armazenamento para novos navios que possam acomodar uma variedade de combustíveis alternativos sem grandes

modificações é crucial. Essa capacidade pode resultar em economias significativas nos custos relacionados à conversão de combustível e à instalação, eliminando a necessidade de substituição dos tanques. Embora os tanques multicombustíveis geralmente sejam mais caros que seus equivalentes monocombustíveis, o aumento do investimento é estimado como substancialmente menor do que o custo de substituição total dos tanques. Caso seja realizada na fase do projeto do navio, a utilização de combustíveis alternativos pode se tornar muito mais atrativa (ABS, 2021).

#### 4.1.1.2 Turbina a gás (TG)

A tecnologia de TG é outra opção encontrada em navios para geração de energia. As TG possuem algumas vantagens em relação ao ICE, oferecendo um design mais leve e compacto, além da capacidade de reduzir as emissões mais baixas de NO<sub>x</sub> (Wang et al., 2024). Em um estudo em navios ro-ro, sigla para “*roll-on/roll-off*”, que é um tipo de transporte marítimo utilizado para transportar veículos e cargas (Belsito, 2023), foi avaliada a viabilidade da utilização de gás natural e hidrogênio como combustíveis para TG, substituindo motores diesel como sistema de propulsão. Foi constatado que as TG alimentadas a gás natural produzem emissões de NO<sub>x</sub> mais baixas do que os motores a diesel, o que as torna uma opção economicamente atraente. Porém, as TG são menos eficientes que os ICE, e muito menos aplicadas na indústria marítima (Wang et al., 2024).

#### 4.1.1.3 Células a Combustível

A célula a combustível é um dispositivo estacionário que produz eletricidade a partir de um processo eletroquímico (Szklo et. al, 2020). Elas convertem diretamente a energia química do combustível em eletricidade de Corrente Contínua (CC) (Inal et al., 2022). Algumas células, como a *solid oxide fuel cell* (SOFC), conseguem operar com menos emissões diretas de CO<sub>2</sub>, mesmo quando utilizam combustíveis com carbono, e possuem alta eficiência de conversão (Baldi et. al, 2020), sendo mais eficientes que os sistemas de combustão (ABS, 2024b). As células do tipo *proton exchange membrane fuel cell* (PEMFC) movidas a hidrogênio são capazes de zerar as emissões de GEE (Tay & Konovessis). Além disso, o calor residual que é gerado pode ser aproveitado eficientemente através de um sistema de combinação de calor e energia (CHP), onde o calor e a eletricidade podem ser utilizados em sistemas do navio. Esse processo permite uma utilização mais eficiente da energia, resultando em potenciais economias de energia de até 40% (ABS, 2024b).

As células a combustível podem ser do tipo *alkaline fuel cell* (AFC), *phosphoric acid fuel cell* (PAFC), *molten carbonate fuel cell* (MCFC), (PEMFC (LT/HT-PEMFC), SOFC e *direct-methanol fuel cell* (DMFC) (Wang et al., 2024). Como são projetadas por meio de módulos, suas características físicas, como peso e tamanho, podem variar conforme a potência necessária pelo sistema em que são utilizadas. A capacidade de potência pode ir de kW a MW, esse último no caso de células a combustível de alta temperatura como a SOFC, por exemplo. Caso a demanda por energia no navio seja alta, e a disponibilidade de espaço para armazenamento de combustível for baixa, as células SOFC e MCFC são as opções mais adequadas. Porém, as PEMFC possuem alta densidade de potência e uma maior maturidade tecnológica, sendo mais utilizadas (Inal et al., 2022). Enquanto a PEMFC pode fornecer até 120 kW, a SOFC fornece até 10 MW (Wang et al., 2024).

O hidrogênio é o principal combustível utilizado nas células atualmente, mas ainda enfrenta desafios, principalmente relacionados à segurança, ao

armazenamento e ao abastecimento (Jélic et al., 2021). Na Figura 9 observamos o funcionamento de uma célula a combustível de hidrogênio do tipo PEMFC.

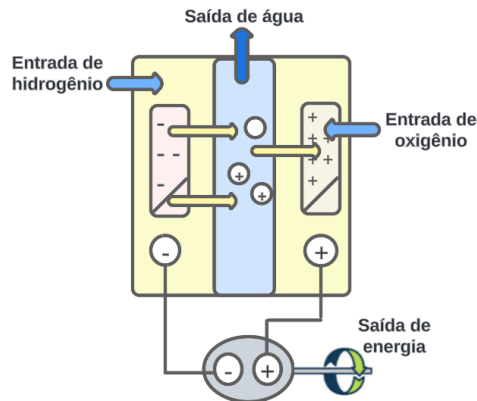


Figura 9: Funcionamento de célula a combustível movida a hidrogênio.  
Fonte: Adaptado de Tay & Konovessis (2023).

Essa célula é composta por dois eletrodos: o ânodo e o catodo. A energia é gerada por meio de reações químicas que ocorrem entre eles. No ânodo, o hidrogênio é dissociado em prótons e elétrons. Os elétrons seguem por um circuito externo, gerando eletricidade, enquanto os prótons atravessam a membrana polimérica para o catodo. No catodo, o oxigênio se combina com os prótons e elétrons para formar água como subproduto. Portanto, não são gerados poluentes como carbono, nitrogênio e outros. Por isso, as células a combustível são consideradas uma das fontes de geração de energia para navios mais promissoras em um futuro próximo. A eficiência do processo de conversão de energia em uma célula a combustível a hidrogênio pode variar entre 40 a 80%. Porém devido a um estágio inicial de maturidade tecnológica, essa tecnologia é atualmente viável para uso em embarcações menores como *ferryboats*, por exemplo (Tay & Konovessis, 2023). As células a combustível de hidrogênio também já foram implantadas em serviços de submarinos navais (ABS, 2024b)

As células do tipo PEMFC não podem utilizar amônia diretamente como combustível. Normalmente para esse combustível é utilizada a célula do tipo SOFC (Tay & Konovessis, 2023). A Figura 10 demonstra o funcionamento de uma propulsão com célula a combustível movida à amônia.

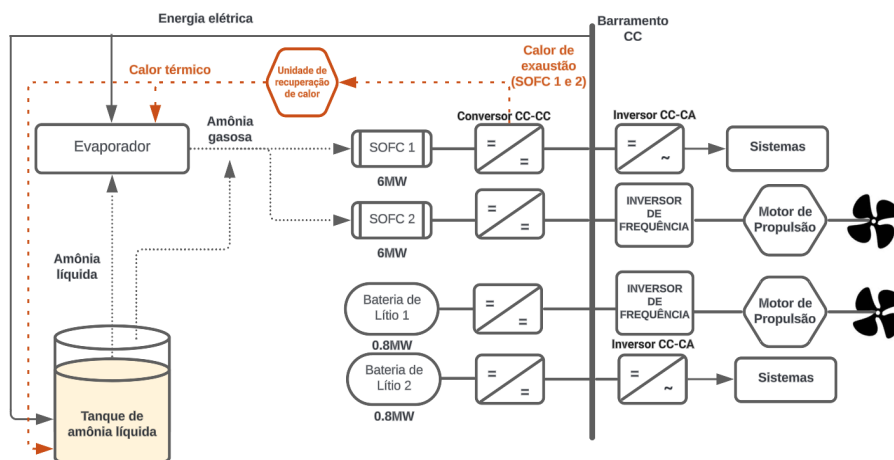


Figura 10: Funcionamento de SOFC de amônia.  
Fonte: Adaptado de Jelić et al. (2021).

A desvantagem da utilização de amônia em células a combustível é a falta de maturidade tecnológica das células necessárias para aplicação. Além disso, existem outros desafios, como o espaço de armazenamento e a produção da amônia. Outro combustível possível de ser aplicado em células a combustível é o metanol (Tay & Konovessis, 2023). Atualmente, apenas o metanol pode ser usado tanto para DMFC, quanto para PEMFC e SOFC, sendo a DMFC a mais eficaz para utilização desse combustível (Wang et al., 2024).

Com relação a parte elétrica, a adoção de células a combustível alcançou um estágio avançado de desenvolvimento, com conversores eletrônicos de potência amplamente disponíveis para conectá-las às redes elétricas de Corrente Alternada (CA) ou CC, podendo ser configurados para regular a tensão e a frequência necessárias, além de realizar o compartilhamento de carga. Adicionalmente, as células podem ser integradas para fornecer potências maiores. Segundo um estudo recente sobre o uso de células a combustível, a potência requerida para uma balsa foi de quase 5 MW, utilizando mais de 40 conjuntos de células a combustível, ou seja, cada conjunto gerou em média 125 kW. Atualmente, não existem regulamentos que estabeleçam requisitos para instalações de células a combustível em navios. A instalação vem sendo realizada com base em estudos (ABS, 2024b).

A tecnologia de células a combustível enfrenta vários desafios, como a gestão do suprimento de hidrogênio e a falta de experiência com combustíveis não convencionais, juntamente com preocupações sobre segurança, volatilidade e áreas perigosas. Além disso, as células a combustível apresentam uma resposta dinâmica mais lenta, o que pode exigir a integração de sistemas de armazenamento de energia para lidar com variações na carga. Além disso, as células a combustível necessitam de sistemas de apoio e controle complexos (ABS, 2024b). Também enfrentam questões relacionadas a confiabilidade e custos de produção. Além disso, a necessidade de instalação de sistema de apoio gera um aumento de peso e pode afetar a estabilidade do navio (Tay & Konovessis, 2023). Quando comparado ao sistema de combustão convencional, o peso das células a combustível somado aos sistemas de apoio e ao peso do armazenamento do combustível, é razoavelmente maior. Porém, as células a combustível têm uma vida útil mais longa do que os motores de combustão a diesel e são 95% recicláveis, com pouca necessidade de manutenção (Energy Observer, 2024). As células a combustível são mais leves que os sistemas de baterias (ABS, 2024b), e apresentam a melhor relação entre densidade de energia e densidade de potência, quando comparadas tanto com baterias, quanto supercapacitores (Jelić et al., 2021).

A IEA atribuiu um nível de prontidão tecnológica médio para essa tecnologia. Atualmente ainda existem poucos navios prontos para uso de células a combustível na carteira de encomendas ou em construção (Baresic et al., 2023). Para garantir a segurança dos sistemas de células a combustível, é crucial considerar aspectos como a toxicidade do combustível, sua inflamabilidade e temperatura de autoignição (Tay & Konovessis, 2023). A fim de minimizar a probabilidade de uma explosão de gás num espaço de célula a combustível, formas de mitigação devem ser concebidas, o que pode incluir, por exemplo, esquemas de ventilação ou arranjos de inertização. Devido à natureza dos vazamentos de hidrogênio dentro das pilhas de células a combustível, o espaço da célula a combustível deve ser classificado como área perigosa. São necessários diversos protocolos para aumentar a segurança, como instalações elétricas com funcionamento automático e com monitoramento e controle, espaços projetados para detectar e conter vazamentos de combustível, desligamento do sistema fora do espaço da célula a combustível, dentre outros (ABS, 2023).

Devido ao processo geralmente manual de montagem das células a combustível e à necessidade de catalisadores caros, como a platina, os custos são elevados, podendo ser até dez vezes mais caros que os motores de combustão interna. Porém, tudo indica que em um futuro próximo os custos serão reduzidos, devido a projetos de produção de células a combustível em larga escala, com utilização de equipamentos automatizados, em conjunto com o uso de catalisadores mais econômicos (ABS, 2024b).

#### 4.1.2 Módulos de energias renováveis

As fontes de energia renováveis (FER) podem ser aplicadas tanto aos navios de propulsão elétricos como híbridos (Inal et al., 2022). As FER são destacadas principalmente como fonte de energia complementar a bordo, e não como fonte principal. Elas trazem redundância energética e melhoram o alcance operacional dos sistemas totalmente elétricos e híbridos (Jelić et al., 2021). A energia nuclear foi categorizada dentro dos "módulos de energia renovável" como uma forma de FER, devido ao uso predominante de urânio como combustível. Esse combustível, quando extraído da água do mar, torna a energia nuclear renovável, pois o seu reabastecimento é contínuo, garantindo um suprimento ilimitado de combustível. Esse processo é semelhante ao funcionamento das fontes de energia eólica e solar (Tay & Konovessis, 2023).

##### 4.1.2.1 Energia eólica

Existem atualmente três tecnologias mais comuns para navios movidos a energia eólica: tecnologia de vela asa, tecnologia de rotor Flettner e tecnologia de pipa (Tay & Konovessis, 2023). A propulsão a partir da energia eólica, denominada de *Wind Assisted Ship Propulsion* (WASP), também já tem as diretrizes apontadas pela DNV GL, que é uma sociedade classificadora, com informações sobre o local e o projeto de instalação (DNV, 2020).

Como tecnologias de vela asa temos as velas conhecidas como de asa rígida, a vela macia (Tay & Konovessis, 2023) e vela de sucção (IMO, 2024i). A tecnologia de vela de asa foi inspirada nas velas tradicionais. Semelhante às asas de um avião, elas podem ser recolhidas quando necessário. Essas velas reduzem o arrasto e aumentam a velocidade do navio. No caso das velas de asa rígida, a economia de combustível pode alcançar 90%, diminuindo assim as emissões de poluentes, como os GEE. Se for necessário melhorar o nível de velocidade, velas adicionais podem ser instaladas nas laterais. A quantidade de velas a ser instalada, de forma geral, depende da necessidade de potência para a operação. Na Figura 11, observa-se o navio de carga *Oceanbird*, que opera com 90% de energia eólica. Ele possui cinco velas que possibilitam atingir uma velocidade de 17 nós. Na Figura 12, observamos o navio híbrido B9, que utiliza 60% de energia eólica com vela macia (Tay & Konovessis, 2023).



Figura 11: Navio Ocean bird com vela rígida.  
Fonte: Tay & Konovessis (2023).



Figura 12: Navio B9 Sail vela macia.  
Fonte: Tay & Konovessis (2023)

As velas de sucção, por sua vez, possuem uma espessura significativa e um mecanismo embutido de sucção de ar. Elas são automatizadas e podem ser dobradas. A maioria dos componentes necessários para manutenção são semelhantes a outros equipamentos utilizados nos navios. Atualmente, essas velas estão instaladas em diversos navios de carga geral, graneleiros e petroleiros/químicos (IMO, 2024i).

O rotor Flettner é um dispositivo cilíndrico vertical que gira em torno de seu eixo, instalado no convés do navio, como observado na Figura 13. Quando o rotor gira, o vento que passa por ele gera uma força lateral que impulsiona o navio para frente, reduzindo a necessidade de combustível convencional e emissões de carbono em navios híbridos com motores a combustão (Tay & Konovessis, 2023). Para facilitar a passagem em locais de baixo calado, foi desenvolvido o rotor Flettner inclinável e dobrável, que pode ser observado na Figura 14.

A tecnologia *Kite*, por sua vez, utiliza os ventos predominantes para impulsionar o navio, e pode ser observada na Figura 15. Pode ser instalada com facilidade em todos os tipos de embarcação e o consumo de combustível e emissões podem ser reduzidas em cerca de 20% (Tay & Konovessis, 2023).



Figura 13: Navio MV Copenhagen com vela rotor flettner.  
Fonte: Tay & Konovessis (2023).



Figura 14: Navio SC Connector com vela rotor flettner dobrável.  
Fonte: Tay & Konovessis (2023).



Figura 15: Navio utilizando vela do tipo Kite.  
Fonte: Tay & Konovessis (2023).

As reduções de consumo de combustível variam de acordo com o tipo de tecnologia de vela utilizada (Chou et al., 2021). A implementação de um WASP tem como vantagem a diminuição do desgaste do motor de combustão. Porém, as velas grandes podem se tornar um empecilho para a manobrabilidade, principalmente em locais com pontes ou portos muito estreitos. Além disso, outra desvantagem da utilização de sistemas eólicos é que os ventos são imprevisíveis, nem sempre na direção e velocidade ideais para navegação (Tay & Konovessis, 2023). A limitação da capacidade de gerar energia, faz com que essas tecnologias sejam ideais para navios menores ou como sistema auxiliar em navios maiores (Wang, Y. et al., 2022). Normalmente necessitam de módulos de armazenamento de energia, como baterias (EMSA, 2023a).

Outro requisito crucial diz respeito à necessidade de amplo espaço disponível no convés, variando geralmente conforme o tipo e o porte do navio. A incorporação de WASP em embarcações menores pode apresentar desafios em termos de espaço e estabilidade. Além disso, o peso do WASP também representa um desafio significativo. Pode ser necessário reforçar a estrutura para suportar não apenas o peso do sistema, mas também as forças exercidas pelo vento (EMSA, 2023a). A utilização de tecnologia eólica para embarcações de forma geral ainda está em desenvolvimento (ABS, 2024b). Velas do tipo rígidas, de sucção, rotor e *kite* podem ser consideradas tecnologicamente maduras (EMSA, 2023a). A Tabela 6, demonstra a altura, diâmetro e peso de cada tipo de tecnologia eólica com maturidade tecnológica.

Tabela 6: Dimensões por tipo de tecnologia eólica com maturidade tecnológica.

Tecnologia	Altura (m)	Diâmetro (m)	Peso (t)
Vela de Sucção	17-26	3-6	15-55
Vela Rígida	28-50	10-20	45-100
Rotor	18-35	4-5	34-90
<i>Kite</i>	área de superfície: 300 a 1000 m <sup>2</sup>		<1

Fonte: Adaptado de EMSA (2023a).

Quanto aos custos, a Tabela 7 apresenta estimativas unitárias para o custo de investimento e o custo operacional das tecnologias eólicas com maturidade tecnológica. O custo de investimento abrange a aquisição e a instalação do WASP, considerando um projeto novo ou um retrofit, enquanto o custo operacional engloba a manutenção e reparo anual, e os custos associados à sua operação. A Tabela 7 inclui um valor mínimo (MIN) para unidades de menor porte e um valor máximo (MAX) para unidades maiores em escala dimensional (EMSA, 2023a).

Tabela 7: Custo WASP.

WASP- Custo (x 1000 euros)	Rotor		Vela de Sucção		Vela Rígida		<i>kite</i>	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
<b>Custo de investimento</b>								
Custo do ativo	560	1050	200	900	438	876	340	2345
Custo de instalação projeto novo	84	158	30	135	66	130	51	351
Custo de instalação retrofit	140	263	50	225	109	219	85	586
<b>Custo operacional</b>	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
Treinamento	10	10	10	10	10	10	10	10
Manutenção e reparo anual	12	22	4	18	8	18	17	117



WASP- Custo (x 1000 euros)	Rotor		Vela de Sucção		Vela Rígida		kite	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
Consumo anual de energia	26	79	26	53	Não disponível			

Fonte: Adaptado de EMSA (2023a).

A redução do consumo de combustível, e conseqüentemente das emissões de GEE por um WASP varia de acordo com tipo de tecnologia implementada, questões operacionais e ambientais, relacionadas à força dos ventos. Um estudo avaliou que velas do tipo rotor geram reduções estimadas em 30% (EMSA, 2023a). Porém, de forma geral, estima-se que dependendo da tecnologia WASP instalada, e em condições favoráveis, a redução de combustível pode chegar a 90%, com uma redução de emissões de CO<sub>2</sub> de até 80% (Tay & Konovessis, 2023).

Referente a segurança, as normas, regulamentos e diretrizes não abordam o impacto da utilização de WASP. Devido ao tamanho das velas, há uma maior necessidade de atenção, principalmente com relação a questões de manobrabilidade, estabilidade, áreas de pouso de helicópteros em navios (EMSA, 2023a), carga e descarga, e às operações em navios (ABS, 2024b).

#### 4.1.2.2 Energia solar

Os painéis fotovoltaicos têm sido comercializados há muitos anos, e a redução dos custos, juntamente com os avanços na eficiência, possibilitaram sua adoção na indústria marítima. Normalmente, a energia solar é convertida em eletricidade por meio desses painéis (Jelić et al., 2021), que necessitam de disponibilidade de grande área para instalação no convés (Tuswan et al., 2022). Pode ser aplicada em navios totalmente elétricos, fornecendo toda a energia necessária ou em conjunto com outras tecnologias elétricas, ou em propulsão híbrida com motores de combustão, como sistema auxiliar. Geralmente a utilização de energia solar em propulsão híbrida é realizada em navios de grande porte, que tem necessidade de cargas elétricas mais altas, e que possuem espaço limitado no convés para instalação de um número suficiente de painéis que atendam a demanda de energia (Tay & Konovessis, 2023).

Nos últimos anos, esse tipo de energia vem sendo implementada mais comumente em balsas e catamarãs para transporte de passageiros (Tay & Konovessis, 2023). A coleta da energia solar vai variar com o ângulo de incidência solar (Martínez-López et al., 2023), e a maneira mais eficiente para instalação dos módulos solares fotovoltaicos é no convés de forma plana para que a luz solar possa ser captada sem obstruções, com o melhor ângulo (Tay & Konovessis, 2023).

A potência de saída dos painéis fotovoltaicos é limitada, pois além da disponibilidade restrita para sua instalação, possuem um baixo nível de potência por metro quadrado (Inal et al., 2022). Estima-se que durante o pico de irradiância solar, no horário de maior intensidade solar e em condições ambientais favoráveis, a potência atinge cerca de 1 kW/m<sup>2</sup> (Martínez-López et al., 2023). Quando comparada a outras fontes, a energia solar possui a menor contribuição de potência para todo o sistema. A eficiência energética gira entre 15 e 20%, mais frequentemente (ABS, 2024b).

Um estudo simulou o desempenho fotovoltaico de navios híbridos que operam em rotas de curta distância, utilizando um gerador diesel e um sistema de armazenamento de bateria, conhecido por *Battery Energy Storage System* (BESS). Considerando uma área disponível de cerca de 200.000 m<sup>2</sup> para a instalação de painéis, constatou-se que a potência máxima implementada para

esse navio seria de 498,42 kWh. A redução de consumo de combustível foi de 15,5%, e das emissões de CO<sub>2</sub> foram de 3,38% (Martínez-López et al., 2023).

Embora a energia solar não seja suficiente para suprir toda a demanda energética de grandes navios, ela pode ser uma fonte viável para abastecer embarcações menores, como ferries, rebocadores e navios de patrulha portuária. Na Figura 16, é apresentado o MS Turanor, um exemplo de navio totalmente movido a energia solar. O catamarã circumnavegou o globo com sucesso por 584 dias de 2012 a 2014 (Tay & Konovessis, 2023). Além disso, como as células fotovoltaicas podem ser produzidas em massa, isso as torna relativamente baratas (ABS, 2024b), além de possuírem custos mais baixos de operação (Yin et al., 2024).



Figura 16: Navio MS Turanor com energia solar.  
Fonte: Tay & Konovessis (2023).

No entanto, existem algumas limitações. É necessário um dispositivo de armazenamento de energia devido à dificuldade de geração estável de energia pelos painéis fotovoltaicos em condições marítimas. Distúrbios ambientais, como a névoa salina e a exposição à água do mar, têm um impacto significativo em sua eficiência (Inal et al., 2022). As variações da temperatura ambiente também impactam na sua eficiência. Além disso, o peso dos painéis somados ao peso dos módulos de armazenamento de energia, como baterias, e outros componentes podem afetar a estabilidade da embarcação, exigindo atenção especial durante a fase de projeto (Tay & Konovessis, 2023). Com relação a questões de segurança, não foram encontradas preocupações quanto à utilização de painéis solares em navios.

#### 4.1.2.3 Energia Nuclear

A energia nuclear possui potencial não apenas para a geração de eletricidade, mas também para ser aplicada em outras áreas, como a produção de hidrogênio e seus derivados. Isso é viabilizado por meio de tecnologias que utilizam tanto o calor nuclear quanto a eletricidade para os processos necessários, e podem ter um impacto substancial na diminuição das emissões de carbono e na transição para fontes de energia mais sustentáveis em diferentes setores (Bhattacharyya et al., 2023). A vantagem do combustível nuclear é que gera emissões insignificantes de CO<sub>2</sub>, mesmo considerando todo o ciclo de vida (Drośnińska-Komor et al., 2022). Atualmente, é possível a instalação de pequenos reatores nucleares modulares compactos para fornecer propulsão de navios. A maturidade tecnológica desses reatores é relativamente alta, e já é utilizada por alguns países (Bhattacharyya et al., 2023).

No reator nuclear ocorrem as reações de fissão nuclear em cadeia. A energia térmica gerada no processo de fissão é utilizada para produzir vapor, que aciona turbinas conectadas a geradores elétricos, fornecendo eletricidade para o

motor de propulsão elétrica. Esse sistema é conhecido como ciclo Rankine a vapor (Galante, 2028; Roumieh & Rocha, 2018). A Figura 17, ilustra uma planta de propulsão nuclear típica.

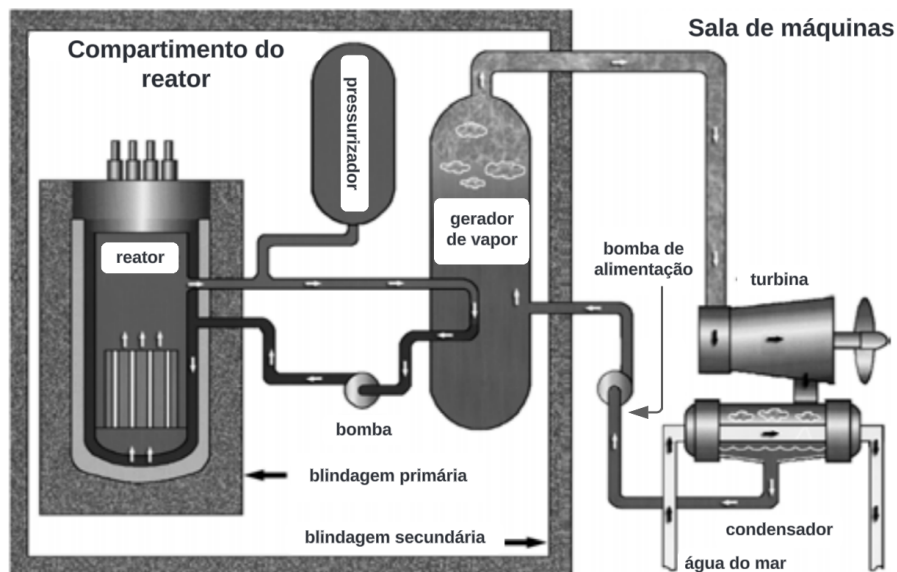


Figura 17: Esquema de funcionamento de reator nuclear do tipo PWR.  
Fonte: Adaptado de NNSA (2020).

Os principais tipos de combustíveis utilizados em reatores nucleares são urânio-zircônio, urânio-alumínio e metal cerâmico, com alta energia específica. Isso significa que os reatores nucleares eliminam a necessidade de reabastecimento por longos períodos. Os tempos operacionais sem reabastecimento ultrapassam 10 anos. Além de urânio, alguns reatores nucleares também podem utilizar outros combustíveis, como plutônio, tório e combustível misto (Bayraktar & Pamik, 2023). O urânio é o combustível amplamente empregado nos reatores, e pode ser encontrado de forma abundante na água do mar e em depósitos rochosos, os minérios de urânio. A propulsão nuclear é geralmente utilizada em navios de guerra e submarinos, devido à capacidade de operar por longos períodos no oceano sem a necessidade frequente de reabastecimento (Tay & Konovessis, 2023).

Diversos pesquisadores acreditam que a solução futura para a indústria marítima está na implementação de pequenos reatores nucleares modulares (Drosińska-Komor et al., 2022). Existem vários tipos de reatores (Bayraktar & Pamik, 2023; Bayraktar & Yüksel, 2023). Os reatores utilizados em meios navais geralmente são dos tipos de água pressurizada, conhecidos como *Pressurized Water Reactor* (PWR) (Bhattacharyya et al., 2023) e são capazes de gerar e fornecer muita energia, utilizando uma quantidade muito pequena de combustível, funcionando em alta potência (World Nuclear Association, 2023). A potência pode variar de 27 MW a 300 MW (Bayraktar & Pamik, 2023), e os novos núcleos de reatores têm sido projetados para durar cerca de 50 anos em um porta-aviões (World Nuclear Association, 2023).

Hoje em dia, praticamente toda a energia nuclear do mundo é gerada por reatores não avançados (Office of Nuclear Energy, 2019), porém, nos últimos anos vem aumentando a pesquisa sobre reatores nucleares avançados (Bhattacharyya et al., 2023). Esses reatores, considerados de quarta geração, ainda estão em fase de desenvolvimento, e prometem uma geração de eletricidade mais segura, econômica e eficiente. Por exemplo, a utilização do reator de 4ª geração *High Temperature Gas-cooled Reactor* (HTGR), traz mais segurança operacional, pois

pode ser utilizado combustível nuclear na forma de combustível *Tri-structural Isotropic* (TRISO) (Drosińska-Komor et al., 2022). O TRISO é um combustível que possui partículas compostas por um núcleo combustível de urânio, carbono e oxigênio, que são mais resistentes à irradiação de nêutrons, corrosão, oxidação e altas temperaturas (Office of Nuclear Energy, 2019). Para resfriar o reator, é utilizado hélio que, em caso de vazamento, não causaria danos à tripulação ou ao meio ambiente (Drosińska-Komor et al., 2022).

Com relação ao espaço utilizado por reatores, um estudo considerando três tipos de navios comerciais distintos verificou que é possível a instalação de reatores no espaço destinado aos motores de combustível convencionais (Drosińska-Komor et al., 2022).

A energia nuclear é comumente utilizada em submarinos, mas também são encontradas em quebra-gelos e porta-aviões (World Nuclear Association, 2023). Os altos custos e preocupações com atracação em portos, restringem a utilização por navios mercantes. Porém, em pesquisa realizada pela associação Câmara Internacional de Navegação foi constatado um maior interesse em energia nuclear desde 2021. Portanto, a aplicação em navios comerciais pode ocorrer nos próximos anos (NEI, 2023).

No entanto, as questões relacionadas à saúde da população e a segurança são obstáculos significativos para a implementação da propulsão nuclear de forma mais abrangente. Uma das maiores preocupações é referente ao potencial de câncer, que pode ocorrer devido à exposição a doses elevadas de radiação ionizante e à presença de resíduos radioativos (Tay & Konovessis, 2023). O reabastecimento de combustível nuclear, a descarga do combustível nuclear utilizado e a gestão desse combustível são etapas complexas da operação de navios que utilizam esse tipo de propulsão (Dushev et al., 2020). As condições meteorológicas adversas, as intensas vibrações e as maiores inclinações e rotações também representam riscos significativos que podem ameaçar gravemente o meio ambiente e a segurança das pessoas. Além disso, incidentes como colisões, encalhes e afundamentos podem resultar em vazamentos de materiais radioativos. Para diminuir esses riscos é aconselhável posicionar os reatores na seção intermediária do navio, pois esta área é menos suscetível a deformações ou vazamentos em caso de acidentes na popa ou na proa (Bayraktar & Pamik, 2023). Apesar dessas preocupações, a experiência da Marinha dos EUA demonstra que ao longo do período de 50 anos não houve nenhum acidente radiológico (World Nuclear Association, 2023).

Nos EUA, todos os navios que empregam propulsão nuclear estão equipados com reatores PWR, todos projetados para resistir a ataques em tempos de guerra. Esses sistemas contam com recursos de controle de danos, redundância e *backups* em sistemas essenciais. São implementadas pelo menos quatro camadas de barreiras para garantir a contenção da radioatividade. Além disso, a tripulação recebe treinamento especializado, tendo a capacidade de responder a qualquer emergência no navio (White, 2021).

Uma das vantagens da aplicação de energia nuclear é que não há necessidade de utilização de módulos de armazenamento de energia (Bhattacharyya et al., 2023). Apesar disso, a utilização desse tipo de propulsão apresenta desvantagens. A principal é relacionada à aceitabilidade social e ética (Inal et al., 2022), além de desafios relacionados à segurança. A restrição à atracação e à navegação em certos portos pode representar um desafio significativo (Bayraktar & Yüksel, 2023). Os custos associados à instalação, à manutenção (Tay & Konovessis, 2023), ao investimento e à operação são muito altos. Além disso, o processo de desmantelamento e o gerenciamento do descarte do combustível nuclear são desafios complexos (Bayraktar & Pamik, 2023). Também é essencial o fornecimento de treinamento extensivo para a tripulação (Bhattacharyya et al., 2023).

### 4.1.3 Módulos de armazenamento de energia

Os sistemas de módulos de armazenamento de energia ou ESS podem ser aplicados tanto em navios elétricos, quanto híbridos (Inal et al., 2022). Esses dispositivos diminuem as perdas mecânicas, apresentam maior eficiência, além de gerar menos ruído e vibração. Além disso, exigem menos manutenção, e por serem aplicados em módulos, acabam tendo mais flexibilidade para ser implementado nos navios, permitindo uma melhor utilização do espaço. Consequentemente, o interesse e a pesquisa sobre a implementação desses módulos têm aumentado significativamente (Wang et al., 2024). Informações como local e projeto de instalação para esses dispositivos ESS já tem as diretrizes apresentadas pela DNV GL (DNV, 2020).

#### 4.1.3.1 Baterias

Uma bateria é um dispositivo que armazena eletricidade e não é uma fonte original de energia. Ao se utilizar baterias ocorrem algumas perdas de eficiência, assim como os demais sistemas de armazenamento de energia e de conversão. Porém, normalmente essa perda é razoavelmente menor do que as que ocorrem em sistemas de combustão convencionais. A aplicação de baterias no setor marítimo pode ser tanto fornecendo energia armazenada de forma única em embarcações elétricas puras, quanto em navios de propulsão híbridos, com uma função complementar aos demais sistemas de propulsão (Jelić et al., 2021). Pesquisas demonstram que as baterias possuem uma maior densidade de energia e confiabilidade, além de custos mais baixos que os supercapacitores (Perčić et al., 2022).

As baterias possuem um equilíbrio entre potência e energia, e existem duas maneiras de quantificar o conteúdo energético de uma bateria. A primeira é a energia específica, medida em watt-hora por quilograma (Wh/kg), importante em aplicações onde o peso da bateria é um fator crítico, como em navios com restrições de peso. A segunda é a densidade de energia, medida em watt-hora por metro cúbico (Wh/m<sup>3</sup>), essencial em situações onde o volume da bateria é um fator crucial, como em navios com espaço limitado para armazenamento (Jelić et al., 2021).

Há muitos anos que as baterias têm sido utilizadas em navios, atuando como fontes de alimentação reserva para serviços de bordo ou fonte de energia de emergência em caso de falha do sistema de energia principal. Tradicionalmente, a bateria de chumbo-ácido era a principal escolha, já tendo sido aplicada como fonte de energia principal para submarinos. As baterias mais recentes evoluíram tecnologicamente, reduzindo o risco de apagões e trazendo maior estabilidade para a microrrede durante a navegação. Além disso, elas oferecem uma resposta mais rápida do que os geradores de emergência e fornecem serviços autônomos quando o navio está atracado. O uso de sistemas de bateria no setor marítimo pode ser aplicado a todos os serviços auxiliares, como redução de pico, nivelamento de carga, nivelamento de energia e suporte à qualidade de energia (Trombetta et al., 2024).

Além disso, essas baterias podem armazenar a energia elétrica gerada por células a combustível ou geradores, sendo geralmente divididas em primárias e secundárias. As primárias são as baterias não recarregáveis. As baterias secundárias, recarregáveis, incluem as de chumbo-ácido, à base de níquel, de íon-lítio, de sódio-enxofre e de fluxo líquido. Na indústria marítima, as baterias mais empregadas são as baterias de íon-lítio, conhecidas como *Lithium-Ion Battery* (LIB). Se comparada com outras baterias elas têm dimensões reduzidas, geram menos danos ao meio ambiente, além de ter alta eficiência, baixa taxa de autodescarga, quase nenhum efeito de memória (Wang et al., 2024), um

fenômeno observado em baterias recarregáveis nas quais elas perdem sua capacidade máxima de energia quando recarregadas repetidamente após serem apenas parcialmente descarregadas. As baterias de íon-lítio possuem cerca de 30% do peso das baterias de chumbo-ácido (ABS, 2024b). Ainda assim, são sistemas que exigem um espaço razoável de armazenamento. A necessidade de espaço é de cerca de 14 vezes o espaço do combustível convencional para fornecer a mesma energia (DNV, 2022).

A utilização de LIB com grande demanda de energia, ainda está em desenvolvimento. A quantidade de pesquisas sobre esse tipo de bateria cresceu nos últimos anos, principalmente buscando aumentar a capacidade energética, tornando-as mais compactas, aumentar a confiabilidade e trazer mais segurança. Devido à menor estabilidade química das baterias de íon-lítio, é necessário implementar monitoramento e proteção para evitar condições como sobrecarga, descarga excessiva, além de altas e baixas temperaturas das células (ABS, 2024b).

Além disso, as baterias íons-lítio possuem um custo mais alto, em virtude da eletrônica especializada que é utilizada para preservar o BESS (Damian et al., 2022). As baterias de íon-lítio possuem um custo em torno de 40% maior que o das baterias de níquel-hidreto metálico. Outra demanda que aumenta os custos, é a necessidade de circuito de monitoramento e proteção (ABS, 2024b). Em 2021, o preço das baterias de lítio eram \$132/ kWh. Em sistemas híbridos, a maior dificuldade na integração com BESS está em alcançar uma dimensão de módulos que mantenha os custos de implementação baixos e que, ainda assim, proporciona uma economia de combustível razoável e um sistema mais eficiente (Damian et al., 2022). Em 2018, a realização de um retrofit em um *Offshore Support Vessel* (OSV) utilizando um BESS de 500 kWh custou cerca de 1,3 milhões de euros, ou seja, 2600 euros por kWh, com tempo de implementação de 6 meses. O valor considera os planos de instalação, preparação no estaleiro, preparação no OSV, entrega de BESS de 500 kWh, instalação, comissionamento, testes, certificações e registros. Já para a instalação de um BESS em um navio de cruzeiro novo em 2021, o custo foi de 1100 euros por kWh, o que demonstra que os custos são bem menores se a aplicação for considerada na fase de projeto. Nesse caso, espera-se uma economia de combustível de 5% e um retorno do investimento em 10 anos (He et al., 2024). As seleções das dimensões do BESS terão impacto em quesitos como o custo, a quantidade de combustível que será reduzida e a vida útil do sistema de baterias. Muitos métodos para tentar dimensionar o tamanho ideal de BESS foram elaborados, como abordagens analíticas e modelos de otimização matemáticos. Quando comparados aos carros híbridos, os navios híbridos exigem que mais energia seja fornecida, e portanto, mais módulos de bateria são necessários, levando assim a BESS mais pesados e mais espaço para alocação a bordo dos navios (Damian et al., 2022).

Com relação a redução de emissões, estudos demonstram que a utilização do BESS em uma balsa de carro totalmente elétrica gerou uma redução de 95%, enquanto em uma híbrida, foi entre 15% a 40% (He et al., 2024).

A *European Maritime Safety Agency* (EMSA) criou um guia para utilização de BESS, contendo requisitos de segurança, instalação e manutenção, dentre outros. Segundo o guia, os BESS devem estar dispostos em uma sala ou espaço a bordo que minimize o perigo às pessoas, danos ao navio, ao meio ambiente, aos espaços do entorno e aos equipamentos enquanto estiver em operação (EMSA, 2023b). Apesar das necessidades de segurança, as baterias de íon-lítio, quando descartadas, são ecologicamente corretas em comparação com as baterias tradicionais. Os limites de toxicidade para baterias de íon-lítio são baixos (ABS, 2024b).

### 4.1.3.2 Supercapacitores

Os supercapacitores, também conhecidos como ultracapacitores ou capacitores eletroquímicos de dupla camada, são dispositivos capazes de armazenar energia através da capacitância, e podem ser utilizados em navios híbridos ou totalmente elétricos (Jelić et al., 2021). Eles são mais compactos que os capacitores e oferecem um maior efeito de capacitância (Wang et al., 2024).

Os supercapacitores podem suportar mais de 500.000 ciclos de operações de carga e descarga profunda, e ao mesmo tempo, ter uma vida útil de cerca de 12 anos. Possuem uma densidade de potência superior às baterias, pois a eletricidade é armazenada fisicamente nos eletrodos (Jelić et al., 2021), variando de 300 W/kg a 5.000 W/kg. O tempo de carga e descarga dos supercapacitores é inferior a 10 segundos, evidenciando a eficiência e rapidez do processo (Wang et al., 2024), que é muito mais rápido que as baterias, além de não liberar calor nem substâncias de alta periculosidade durante a operação. Porém sua densidade de energia é muito baixa (5 Wh/kg) e possui uma alta taxa de autodescarga (Jelić et al., 2021), necessitando, por exemplo, de outro sistema de armazenamento de energia, como baterias, para manter sua operação sustentável a longo prazo (Inal et al., 2022). Sendo assim, são utilizados como módulo de armazenamento adicional, fornecendo alto nível de energia em pouco tempo ou em um pico de consumo de energia, quando a demanda instantânea excede o fornecimento normal (Jelić et al., 2021), pois nesses casos, são melhores que as baterias devido a densidade de potência alta (Inal et al., 2022). Os supercapacitores também conseguem, em um curto período de tempo, melhorar a estabilidade da rede de alta frequência rapidamente (Wang et al., 2024). Além disso, quando aplicados em conjunto com baterias, são capazes de protegê-las contra picos de carga extremos, prolongando a sua vida útil e permitindo um maior aproveitamento do armazenamento de energia (ABS, 2024b).

Os supercapacitores são considerados viáveis e seguros para implementação, embora ainda estejam em fase de desenvolvimento tecnológico. Além disso, pelo fato de seu material catódico ser predominantemente à base de carbono com uma quantidade mínima de oxigênio ligado, não há risco de fuga térmica, condição em que o calor gerado dentro de um dispositivo causa reações químicas que produzem ainda mais calor, resultando em aumento rápido da temperatura e potencial risco de incêndio ou explosão. Em caso de curto-circuito dentro do supercapacitor, há uma válvula de alívio de pressão que reduz a pressão interna, minimizando o risco de explosão (ABS, 2024b).

### 4.1.4 Métodos de propulsão

Nas embarcações, a propulsão mecânica funciona com um motor principal conectado a uma caixa de engrenagens, que movimenta os hélices. Nas últimas décadas, a propulsão elétrica passou a ser adotada por alguns navios, com o intuito de conseguir uma maior eficiência energética, diminuir o nível de ruído e vibrações e reduzir os custos de manutenção. Além disso, a intenção era melhorar a utilização do espaço da embarcação, obtendo mais flexibilidade. A transição para propulsão elétrica vem crescendo na indústria naval na busca por soluções mais eficientes e com menor impacto ambiental (Trombetta et al., 2024).

Atualmente, existem três tipos de propulsão: mecânica, elétrica e híbrida. Cada uma delas é apresentada nesta subseção.

#### 4.1.4.1 Propulsão mecânica

Atualmente a maior parte das embarcações utiliza a propulsão mecânica, com aplicação de ICE. Normalmente, o motor de combustão principal, ICE ou TG,

é conectado ao hélice, geralmente do tipo passo fixo, através de embreagens. Já o motor auxiliar, ICE ou TG, é conectado a um gerador, que produz energia elétrica CA, que é integrada à rede elétrica da embarcação. A energia que foi gerada é então convertida em CC, ou outras formas de CA, por meio de transformadores, permitindo a alimentação de todos os sistemas do navio (Wang et al., 2024).

Dependendo do motor de combustão interna, é possível queimar combustíveis tradicionais e/ou combustíveis alternativos, nesse caso resultando em um menor nível de emissões. A propulsão mecânica tem uma maior simplicidade, com um *design* menos complexo e mais fácil de ser operado. Além disso, possui um custo mais baixo, quando comparado a outros tipos de propulsão. Porém, não oferece muita manobrabilidade, sendo afetada pela forma com que o motor funciona e por dificuldades no processo de reversão da embarcação. Em grandes navios, muitas vezes é necessário que o motor funcione de marcha à ré ou que se utilizem propulsores laterais ou rebocadores para mudança de direção. Já os navios de pequeno e médio porte normalmente fazem uso de hélices de passo controlável, o que torna mais fácil o processo de mudança de direção. Uma desvantagem do sistema de propulsão mecânica, caso ocorra uma falha em um componente, é possível que a operação seja comprometida. Além disso, se o ICE funcionar fora das condições de projeto, o consumo de combustível irá aumentar, assim como as emissões de poluentes (Wang et al., 2024). A Figura 18 demonstra o funcionamento de um navio com propulsão mecânica.

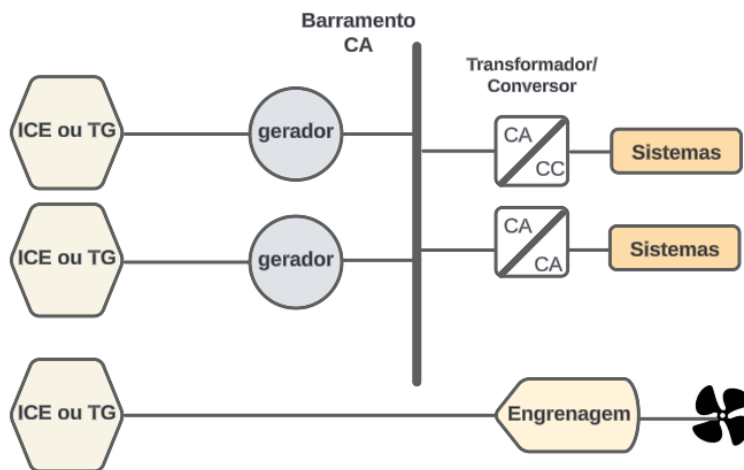


Figura 18: Esquema de propulsão mecânica.  
Fonte: Adaptado de Wang et al. (2024).

Na busca pela descarbonização do setor marítimo, a utilização de motores de combustão interna com combustíveis alternativos do tipo LNG, LPG, metanol e biocombustíveis, é a tendência no curto prazo (Wang et al., 2024). Já existem motores disponíveis para esses combustíveis (MAN, 2024a; Wärtsilä, 2024a; Wärtsilä, 2024b).

#### 4.1.4.2 Propulsão elétrica

A propulsão elétrica pura vem sendo bastante pesquisada no momento, e é o sistema mais avançado de propulsão da indústria naval. A intenção é cessar o uso de combustíveis com alto teor de carbono, ao mesmo tempo que mantém-se o desempenho e o alcance operacional (Jelić et al., 2021). No sistema puramente elétrico, todos os sistemas, até mesmo a propulsão, são eletrificados, e a energia é fornecida por módulos de geração ou de armazenamento de energia, como



baterias ou células a combustível. No caso desses sistemas serem instalados em conjunto com um motor de combustão, o tipo de propulsão da embarcação se torna “híbrida” (Trombetta et al., 2024).

A propulsão totalmente elétrica geralmente utiliza um dispositivo adicional de geração de energia, com o intuito de aumentar a redundância do sistema, e pelo menos um sistema de armazenamento de energia. A forma mais simples de navio elétrico é a utilização apenas de um ou mais tipos de baterias do tipo recarregáveis, que são carregadas a partir de rede elétrica em terra quando a embarcação está atracada. A energia armazenada, e fornecida, deve ser suficiente para no mínimo uma viagem (Jelić et al., 2021). Quando BESS são utilizados a eficiência da embarcação pode chegar a 70%, enquanto a propulsão mecânica a diesel é de apenas 30% (Trombetta et al., 2024). No entanto, a implementação de BESS ainda necessita de avanços tecnológicos para aumentar a capacidade de armazenamento de energia. Isso permitiria que as embarcações alcançassem distâncias maiores sem a necessidade de recarga (Jelić et al., 2021). A Figura 19 exemplifica um esquema de navio elétrico puro utilizando baterias e supercapacitores (Jelić et al., 2021).

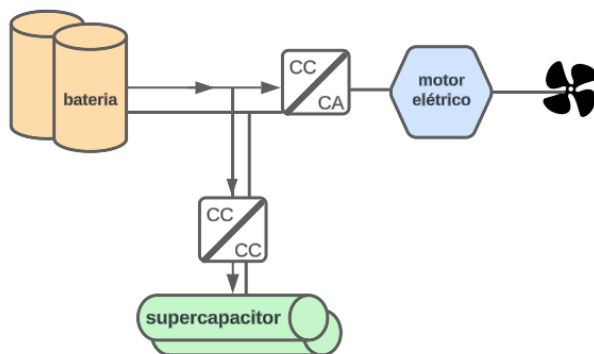


Figura 19: Navio elétrico com bateria e supercapacitor.  
Fonte: Adaptado de Jelić et al. (2021).

Na propulsão elétrica, a manobrabilidade é alta. Os hélices dos navios podem ser instalados sem um eixo de transmissão passando pelo casco, o que traz inúmeras vantagens, como maior flexibilidade de design e menor nível de ruídos. Por isso, a propulsão elétrica vem sendo utilizada principalmente por navios de passageiros (Wang et al., 2024).

Dentre as opções de propulsão elétricas para navios, estão a utilização de células a combustível e bateria, por exemplo, podendo também incorporar o uso de supercapacitores (Wang et al., 2024). Ao optar pela utilização de células a combustível, o sistema adquire uma eficiência alta, além de atingir zero emissões (Wang et al., 2024). Quando combinadas com baterias, o sistema é aprimorado, aproveitando a alta densidade de energia das células a combustível junto com a capacidade de resposta mais rápida das baterias, além de normalmente eliminar a necessidade de atracação para recarregar as baterias. Os módulos de baterias são essenciais principalmente quando implementadas células a combustível de alta temperatura, como as SOFC, pois conseguem auxiliar no equilíbrio das variações de carga (Jelić et al., 2021). A Figura 20 exemplifica um esquema de navio elétrico puro com utilização de célula a combustível e bateria.

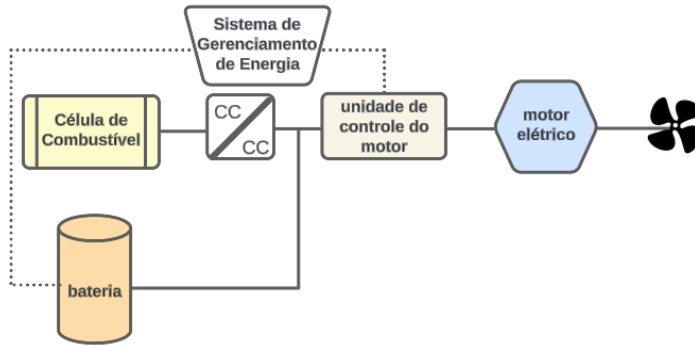


Figura 20: Exemplo de navio totalmente elétrico com utilização de célula a combustível e bateria.

Fonte: Adaptado de Jelić et al. (2021).

A forma mais avançada de navios totalmente elétricos, é a implementação de fontes de energia renováveis como sistemas adicionais. A energia solar e eólica tem se destacado em aplicações marítimas nos últimos anos (Jelić et al., 2021). A Figura 21 exemplifica um navio elétrico puro com utilização de energia solar e do vento e um dispositivo de ESS, como bateria ou supercapacitor.

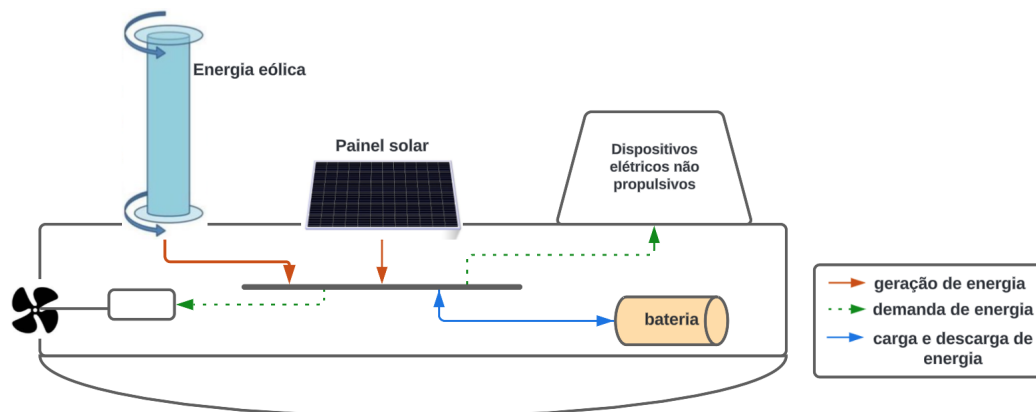


Figura 21: Navio totalmente elétrico utilizando energia eólica e solar com sistema de armazenamento de energia por bateria.

Fonte: Adaptado de Jelić et al. (2021).

A propulsão elétrica é a mais eficiente energeticamente e a mais ambientalmente amigável, em termos de GEE (Trombetta et al., 2024), pois pode eliminar o consumo de combustíveis fósseis (Jelić et al., 2021). Os motores elétricos são mais silenciosos e necessitam de menos manutenção. Porém, necessitam de uma quantidade grande de energia armazenada a bordo do navio (Trombetta et al., 2024).

Como os sistemas totalmente elétricos possuem muitos componentes, é possível que haja perda de energia, necessitando de mais controle. É necessário monitorar em tempo real a geração de energia dos dispositivos, trazendo mais eficiência. Por exemplo, é possível desconectar dispositivos com redundância quando o navio está atracado ou navegando com velocidade mais baixa. Adicionar um Sistema de Gerenciamento de Energia (SGE) permite um controle maior entre o fornecimento e a demanda de energia, aumentando a disponibilidade (Wang et al., 2024).

Atualmente, a propulsão elétrica tem sido aplicada em navios de menor porte, principalmente barcos de lazer. Apesar da grande importância das baterias para navios de médio e grande porte, normalmente a propulsão aplicada é a híbrida. A utilização de baterias como fonte de energia para navios é mais fácil em

navios menores (Trombetta et al., 2024), sendo mais viáveis para navios que operam navegando a curta distância (Perčić et al., 2022). Apesar disso, o nível de maturidade tecnológica das baterias atribuído pela IEA é alto (Baresic, 2023).

Tomando como exemplo os *ferries* totalmente elétricos na Europa, foi constatado que ainda existem limitações operacionais relacionadas aos horários e ao tempo de carregamento nos portos. A operação desses navios difere significativamente daqueles que utilizam combustíveis convencionais em motores de combustão (Gagatsi & Halatsis, 2016). Em relação aos custos, embora sejam elevados, estudos indicam que o retorno dos investimentos iniciais necessários para a construção ou conversão de navios ocorrerá em um período de 5 a 8 anos (Kolodziejcki et al., 2023).

#### 4.1.4.3 Propulsão Híbrida

A propulsão híbrida pode se adaptar melhor a uma variedade mais ampla de operações de navios do que a propulsão totalmente elétrica, e tudo indica que poderá ser amplamente utilizada em um futuro próximo (Wang et al., 2024). A adoção desse tipo de propulsão é especialmente ideal quando há uma grande variação na demanda de potência durante as operações (Jelić et al., 2021).

A propulsão híbrida normalmente combina a utilização de motor de combustão com módulos de geração e armazenamento de energia elétricos (Trombetta et al., 2024). Os navios que a utilizam podem obter mais eficiência, pois podem alternar as fontes de energia como motor de combustão interna e sistema elétrico, de acordo com as condições operacionais, aumentando a flexibilidade. Pode-se utilizar, por exemplo, a propulsão elétrica durante a atracação e desatracação do navio, devido a maior manobrabilidade, enquanto a propulsão mecânica pode gerar energia estável, caso necessário. Quando a embarcação realiza uma viagem de longa distância, mantendo uma velocidade constante, os componentes elétricos podem sustentar de forma estável as cargas do navio. Simultaneamente, o motor de combustão interna permite uma operação eficiente por períodos prolongados, resultando em um consumo otimizado de combustível e, conseqüentemente, na redução das emissões de GEE. Em operações onde são necessárias baixa potência, a propulsão elétrica pode ser aplicada, e o ICE desligado. De forma geral, a modularidade da propulsão híbrida permite a utilização de componentes redundantes, facilitando a resolução de falhas que possam surgir, aumentando a flexibilidade do sistema. Estas flexibilidades otimizam a aplicação da energia, de acordo com a operação, auxiliando consideravelmente na redução de emissões de poluentes (Wang et al., 2024).

Normalmente, a propulsão híbrida é composta por um motor de combustão interna e um motor elétrico, utilizando outros módulos de geração de energia e módulos de armazenamento. O motor elétrico recebe energia elétrica, podendo recebê-la de diversas fontes, e a converte em energia mecânica (Jelić et al., 2021). Dentre as diversas fontes estão células a combustível, bateria e supercapacitores, fontes de energia renovável eólica ou solar e os motores de combustão interna (Inal et al., 2022; Wang et al., 2024). A Figura 22 demonstra possíveis configurações utilizando os módulos de geração e armazenamento de energia em um sistema híbrido.

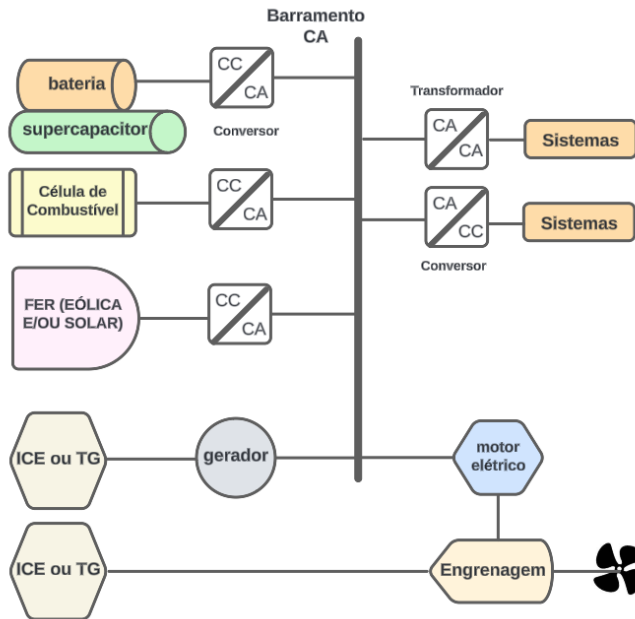


Figura 22: Esquema híbrido com ICE/TG, célula a combustível e bateria/supercapacitor  
 Fonte: Adaptado de Inal et al. (2022) e Wang et al. (2024).

Os sistemas de células a combustível são geralmente combinados com baterias, pois os sistemas movidos unicamente por células a combustível apresentam uma capacidade de resposta dinâmica reduzida para suprir a demanda de energia em momentos de pico (Arabnejad et al., 2024). As baterias apresentam uma solução eficaz para equilibrar a rede elétrica durante esses períodos de pico, desempenhando a função de *peak shaving*. Elas armazenam eletricidade em momentos de baixa demanda e a liberam quando a demanda atinge seu ápice, aliviando a pressão sobre o sistema elétrico. Em sistemas mecânicos, essa energia extra necessária é gerada a partir de combustíveis fósseis. No entanto, a adoção de baterias permite mitigar as flutuações de demanda e estabilizar o fornecimento de energia de forma mais sustentável (Abdelkareem et al., 2023).

Para implementar um sistema híbrido utilizando BESS em uma propulsão mecânica, uma solução é instalar um gerador de eixo de velocidade variável, ou máquina síncrona de ímã permanente, conectado ao eixo principal por meio de uma caixa de engrenagens. Assim, a propulsão recebe um sistema de tomada de força, ou *power take out* (PTO) e entrada de potência, ou *power take in* (PTI). A PTO possibilita que a energia gerada seja armazenada na bateria quando a carga está baixa. Já a PTI gera força de torque na caixa de engrenagens quando necessário. Dessa forma, o BESS viabiliza desconectar os motores de combustão interna no navio. Porém, quando os navios recebem energia apenas do BESS podem ter que operar com algumas restrições, como limite de velocidade e tempo de operação (Trombetta et al., 2024). A Figura 23 demonstra o funcionamento dessa configuração.

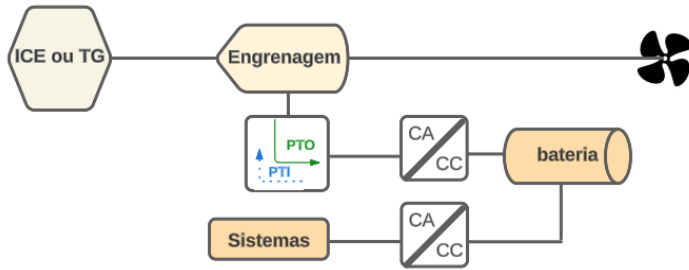


Figura 23: Exemplo de sistema híbrido com ICE e BESS.  
 Fonte: Trombetta et al. (2024).

Nos últimos anos, verificou-se a aplicação de fontes de energia renováveis solar e eólica em sistemas totalmente elétricos e híbridos. Essa combinação de módulos de geração e armazenamento de energia aumenta a autonomia da embarcação e traz uma redundância de energia do navio (Jelić et al., 2021).

As configurações mais usuais de propulsão híbrida são em série, paralela e série-paralela (Jelić et al., 2021). Na híbrida em série, são utilizadas pelo menos duas fontes de energia em série. O motor de propulsão elétrico recebe energia de geradores que são acionados por um motor de combustão interna (Jelić et al., 2021), ou a partir de outros módulos de geração de energia (Inal et al., 2022). A energia elétrica é transferida entre o ICE e o motor de propulsão e, portanto, não há uma conexão mecânica com o hélice (Jelić et al., 2021). A Figura 24 demonstra um esquema de uma propulsão híbrida em série.

A híbrida paralela é normalmente composta por dois motores de combustão interna e motor elétrico, conectados por uma caixa de cambio ou embreagem que aciona o hélice. Os motores elétricos podem receber energia de diversos módulos de armazenamento e de geração de energia como, por exemplo, baterias e geradores acionados por motor de combustão. É possível utilizar os dois sistemas juntos ou separadamente (Jelić et al., 2021). A Figura 25 demonstra o esquema de propulsão híbrida em paralelo. A série-paralelo é uma combinação das configurações em série e paralela (Jelić et al., 2021), e o funcionamento pode ser observado na Figura 26.

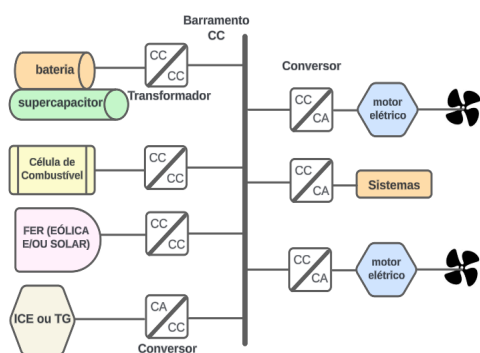


Figura 24: Configuração híbrida em série.  
 Fonte: Adaptado de Inal et al. (2022).

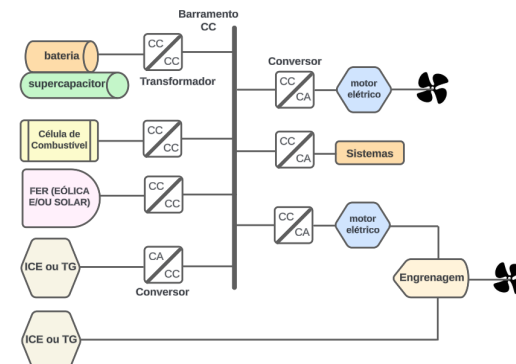


Figura 25: Configuração híbrida em paralelo.  
 Fonte: Adaptado de Inal et al. (2022).

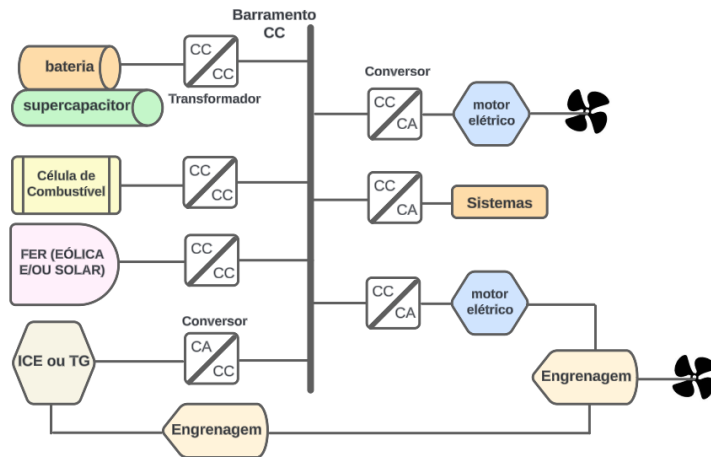


Figura 26: Configuração híbrida série-paralela. Adaptado de Inal et al. (2022).

Referente a ligação elétrica dos módulos de geração e armazenamento de energia com o barramento da embarcação, pode ser projetada de duas maneiras principais: arquitetura de barramento CC e arquitetura de barramento CA (Fan et al., 2023). O uso de conversores ou transformadores variam com o tipo de barramento e tecnologia, conforme observado nas Figuras 20, 22, 23 e 24 (Jélic et al., 2021; Inal et al., 2022).

Pesquisas apontam que normalmente navios que mantêm sua velocidade de operação menores que 40% da capacidade máxima escolhem sistemas híbridos. Dessa forma, conseguem níveis de ruídos menores e uma maior confiabilidade da propulsão (Nguyen et al., 2021). Além disso, atualmente cerca de 40% dos navios em carteira de encomenda, com utilização de combustíveis alternativos, são híbridos. Os argumentos são que sistemas híbridos têm uma maior flexibilidade operacional, e o armazenamento de energia em dispositivos como baterias, diminuem as horas de funcionamento dos geradores a diesel, gerando uma maior eficiência e diminuindo a necessidade de manutenção (Kolodziejcki et al., 2023). A implementação de sistemas de propulsão híbridos diesel-elétrico é considerada simples (Jelić et al., 2021).

Os sistemas híbridos podem ser implementados em uma extensa variedade de embarcações (Wang et al., 2024). Porém, existem algumas desvantagens e desafios da propulsão híbrida, que são comuns à propulsão elétrica. Os altos custos dos módulos de células a combustível e baterias íon-lítio, dificultam sua adoção generalizada. Há também preocupações com a segurança das células a combustível e com questões operacionais desses navios. Também há a necessidade de treinamento da tripulação para lidar com essas novas tecnologias com segurança. Além disso, como são sistemas mais complexos, exigem uma necessidade de gerenciamento da energia a bordo, com utilização de sistemas de gestão de energia (EMS) (Wang et al., 2024).

#### 4.1.5 Energia

Atualmente, existe uma grande variedade de combustíveis alternativos para utilização no setor marítimo, inclusive provenientes de fontes renováveis de energia. Com o intuito de facilitar o entendimento desses combustíveis, a organização desta Subseção foi realizada conforme apresentado em Carvalho et al. (2021), dividindo em 3 grupos principais. Os biocombustíveis destilados que podem ser aplicados em motores diesel convencionais fazem parte do grupo A. Eles são chamados de biocombustíveis do tipo *drop-in*, que significa que podem ser utilizados nos motores de combustão de ignição convencionais (Carvalho et

al., 2021). Testes estão sendo realizados para utilização direta, e com misturas ao combustível tradicional, sem que haja a necessidade de realizar modificações no sistema ou retrofits no navio (ABS, 2021). Fazem parte desse grupo os óleos vegetais puros, ou *Straight Vegetable Oil* (SVO), os óleos vegetais hidrotratados ou *Hydrotreated Vegetable Oil* (HVO) e o biodiesel. Além desses combustíveis, também fazem parte os biocombustíveis produzidos a partir de biomassa lignocelulósica e bioálcoois, que são o diesel *Fischer-Tropsch* (FT-diesel) e o *Alcohol-based diesel* (ATD) (Carvalho et al., 2021). A Figura 27 ilustra a matéria-prima, processo, combustível e propulsão desse grupo.

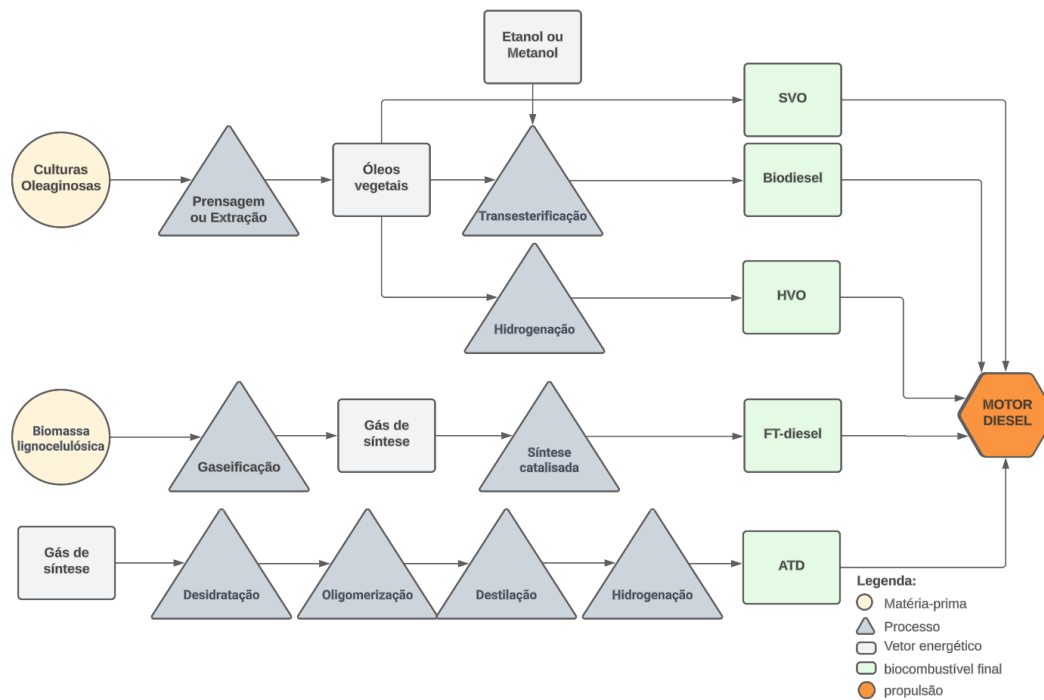


Figura 27: Grupo A (biocombustíveis destilados adequados para motores diesel).  
Fonte: Adaptado de Carvalho et al. (2021) e ABS (2021).

Os biocombustíveis neutros em carbono formados por álcoois e gases liquefeitos foram inseridos no grupo B. Esses biocombustíveis não são do tipo *drop-in*, sendo necessário motores de ignição comandada ou *dual fuel*. Fazem parte desse grupo, o biometano liquefeito, Bio-LNG, o biometanol e bioetanol, produzidos a partir da biomassa (Carvalho et al., 2021), e o biogás liquefeito de petróleo ou Bio-LPG (Johnson, E., 2017; Johnson, E., 2019). A Figura 28 ilustra a matéria-prima, processo, combustível e propulsão desse grupo.

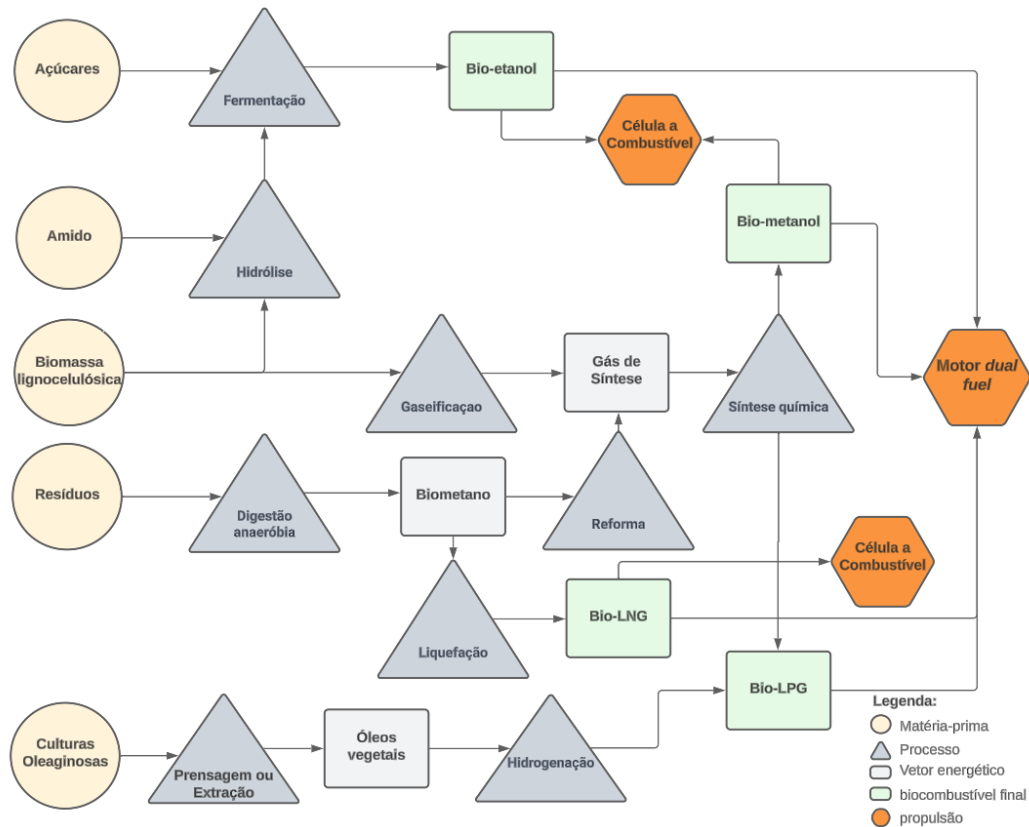


Figura 28: Grupo B (biocombustíveis formados por álcoois e gases liquefeitos).

Fonte: Adaptado de Duong et al. (2024); Carvalho et al. (2021); Johnson (2017) e Johnson (2019).

O grupo C engloba o hidrogênio, a amônia e os eletrocombustíveis, como e-diesel ou eletrodiesel, e-metano ou eletrometano ou e-LNG, e e-metanol ou eletrometanol. Assim como os biocombustíveis capturam  $\text{CO}_2$  durante o crescimento da biomassa por meio da fotossíntese, os eletrocombustíveis utilizam  $\text{CO}_2$  capturado da atmosfera ou de processos industriais (Carvalho et al., 2021). A Figura 29 ilustra a matéria-prima, processo, combustível e propulsão desse grupo.



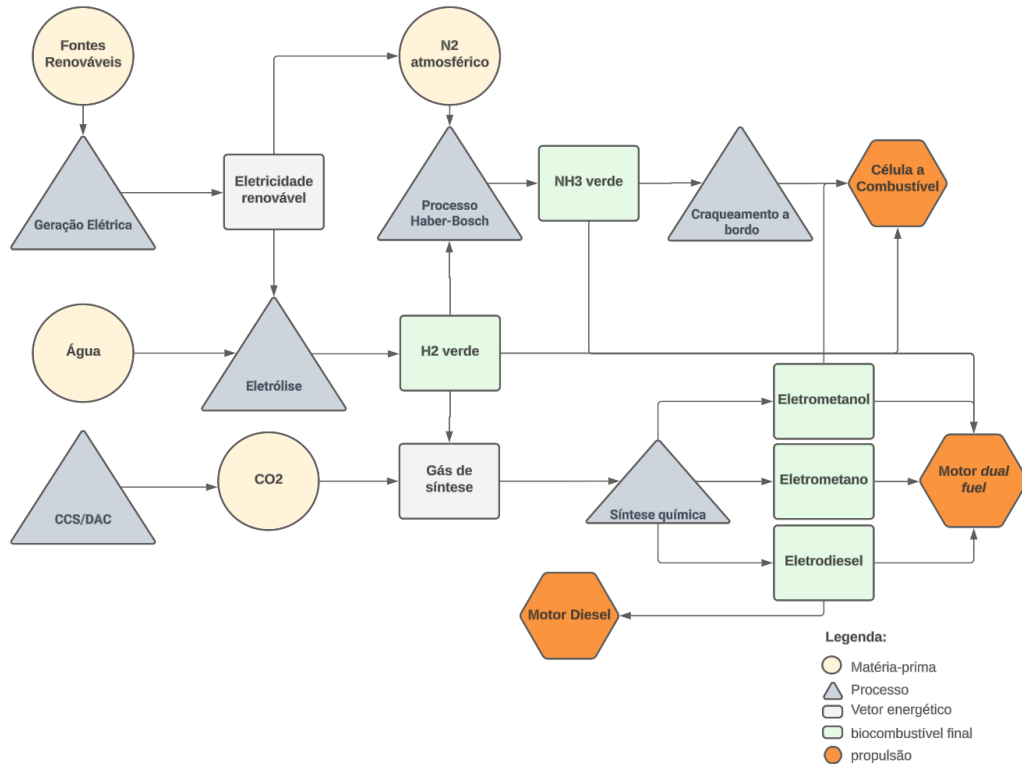


Figura 29: Grupo C (hidrogênio, a amônia e eletrocombustíveis).  
 Fonte: Adaptado de Carvalho et al. (2021) e Meca et al. (2023).

#### 4.1.5.1 Grupo A: Biocombustíveis do tipo drop-in

De forma geral, os biocombustíveis do tipo *drop-in* possuem uma densidade energética próxima ao HFO e MGO, indicando um potencial maior para oferecer maior autonomia ou requerer menos espaço de armazenamento (CEBRI, 2023). Dentre as limitações do uso de biocombustíveis estão a baixa disponibilidade e o alto custo. Porém o cenário tende a mudar conforme os fornecedores aumentem sua produção (ABS, 2021). A produção de alguns biocombustíveis no Brasil já está consolidada, e o país tem terra e água disponíveis para aumentar a oferta (MME, 2022). Porém, existem desafios e questões, não só no Brasil, como no mundo todo, relacionados a sustentabilidade, devido ao uso da terra, principalmente a produção de biomassa (DNV, 2023), possibilidade de desmatamento (Kovacova M & L'az'aroiu, 2021) e a concorrência com a produção de alimentos (Ciggin et al, 2021; Santos et al., 2021).

Diversos testes com biocombustíveis estão sendo realizados globalmente para avaliar seus efeitos em máquinas e nas emissões das embarcações (ABS, 2021). Devido à semelhança com combustíveis tradicionais, os biocombustíveis do Grupo A são considerados seguros (Carvalho et al., 2021).

Os biocombustíveis podem sofrer competição com o setor rodoviário e aéreo. O HVO e o FT-diesel possivelmente irão enfrentar a concorrência com os dois setores (CEBRI, 2023). O Biodiesel e o ATD, por exemplo, vêm sendo aplicados no setor rodoviário, o que reduz sua disponibilidade (Carvalho et al., 2021). Como o FT-diesel é uma alternativa com custos mais elevados e de alta qualidade, provavelmente será mais adequado para o setor da aviação (MME, 2022).

O Biodiesel pode ser produzido a partir de uma grande variedade de fontes, como óleo de palma e óleo vegetal não comestível, e até mesmo gordura animal (Shelare et al., 2023), e o Brasil é um dos maiores produtores desse

biocombustível (BNDES, 2022a). A estimativa é que mais de 350 oleaginosas possam ser fonte para a produção do biodiesel (Shelare et al., 2023).

O biodiesel vem sendo misturado ao diesel em motores auxiliares. No entanto, problemas relacionados à sua baixa estabilidade prejudicam sua implementação como uma alternativa imediata (Carvalho et al., 2021). Outra preocupação envolve a potencial contaminação da água. O processamento do biodiesel pode resultar na presença de mono e diglicerídeos, que absorvem água rapidamente. Estes compostos atuam como emulsificantes, tornando a separação de óleo e água mais difícil. Adicionalmente, o teor de água no combustível aumenta devido à água residual do processamento ou à condensação. Isso pode elevar a acidez do combustível, uma vez que a água pode facilitar a hidrólise de ésteres em ácidos carboxílicos, caso estejam em alta temperatura ou pH extremo. Também há um risco aumentado de contaminação por micróbios, tornando necessária a aplicação de biocidas como medida de mitigação (IEA, 2017). Uma pesquisa realizada por uma empresa especialista em tecnologia de tratamento de combustíveis mostrou que outra medida possível é criar uma membrana protetora para manter a separação entre o combustível e a água no tanque, e assim evitar o crescimento de bactérias (Future Fuels, 2021).

No Brasil, o biodiesel é produzido a partir da transesterificação ou esterificação de matérias graxas, de origem vegetal ou animal (ANP, 2023). Quando o biodiesel é produzido por esse processo, suas propriedades se assemelham às do diesel convencional. Utilizar este processo em lipídios renováveis com álcoois torna a produção de biodiesel mais econômica, além de apresentar outras vantagens associadas (Shelare et al., 2023). Além disso, o metanol é normalmente utilizado como matéria-prima para a produção de biodiesel, sendo aplicado no processo de transesterificação de óleos vegetais e gorduras animais (da Silva et al., 2021). Um fator que afeta sua atratividade é a questão da sustentabilidade de produção de oleaginosas, especialmente devido ao uso de metanol de origem fóssil no processo atual de conversão (Carvalho et al., 2021). O óleo de soja é a principal matéria-prima para a produção de biodiesel no Brasil, representando 65,8% da produção em 2022. Algumas matérias-primas alternativas, como o sebo bovino, também são utilizadas, correspondendo a quase 8% da produção nesse mesmo ano. O uso de gordura animal pode reduzir a pegada de carbono em até 7 vezes em comparação ao biodiesel de soja, e em até 23 vezes em comparação ao diesel fóssil (MME, 2023a). A produção a partir de óleo de peixe, óleo de sebo e microalgas, ainda estão em desenvolvimento. Elas podem vir a permitir no futuro uma produção em maior escala. Por exemplo, a velocidade de crescimento das algas é rápida, e não afeta o fornecimento de alimentos. Porém, os processos de extração do óleo são caros e requer muita energia para a produção (Shelare et al., 2023). Um estudo demonstrou que a produção de biodiesel a partir de algas reduz o problema de competição com a produção de alimentos, pois é altamente eficiente em termos de uso da terra. No entanto, conclui-se que, em termos de eficiência energética, os biocombustíveis produzidos a partir de algas possuem um desempenho inferior, já que sua produção demanda mais energia do que são capazes de fornecer (Carneiro et al., 2017).

O biodiesel é valorizado por sua sustentabilidade, biocompatibilidade, não toxicidade e elevado ponto de fulgor. No entanto, apresenta algumas limitações, como baixa volatilidade e menor conteúdo energético, além de desafios na qualidade da pulverização. Também tende a gerar mais poluição por óxido de nitrogênio, tem maior ponto de fluidez e pode sofrer mais com turvação comparado ao diesel convencional (Shelare et al., 2023).

Os biocombustíveis que são utilizados atualmente, chamados de *Fatty Acid Methyl Esters* (FAME), como o Biodiesel FAME, possuem propriedades físicas e químicas que dificultam a mistura com combustíveis fósseis convencionais e

apresentam desafios no armazenamento a bordo. A composição dos biocombustíveis inclui diversos tipos de ácidos graxos, os quais influenciam a forma como o biocombustível queima, podendo afetar sua miscibilidade com outros combustíveis e sua resistência à degradação. Atualmente, estão sendo realizadas pesquisas para avaliar a compatibilidade dessas misturas com combustíveis convencionais (DNV, 2022). Embora a utilização do biodiesel como combustível marítimo ainda esteja em fase de testes, com operações em andamento para validar sua eficácia em diferentes percentuais de mistura (CEBRI, 2023), a ANP já autorizou a adição de até 24% de biodiesel ao bunker marítimo. Testes mostraram que a adição desse percentual resultou em uma redução aproximada de 19% nas emissões de GEE em comparação com o combustível sem conteúdo renovável (ANP, 2024a).

Utilizar biocombustíveis puros em navios pode ocasionar danos ao sistema de fornecimento de energia, reduzir a eficiência e aumentar o consumo específico, ou seja, ter que utilizar mais combustível para produzir uma determinada quantidade de trabalho. Algumas empresas fabricantes de motores navais estão realizando testes com misturas do biodiesel. Até o momento, testes contendo até 30% v/v do biocombustível obtiveram resultados satisfatórios, sem que houvesse necessidade de modificações nos motores (CEBRI, 2023). Testes com outros percentuais vêm sendo realizados ao redor do mundo, inclusive com 100% v/v de biodiesel, o biodiesel B100 (CLS, 2021).

Devido à sua viscosidade mais elevada em comparação com o diesel convencional, o biodiesel requer pré-aquecimento. O nível de acidez, semelhante ao dos óleos vegetais simples, está diretamente relacionado à matéria-prima que é utilizada (CEBRI, 2023). Por causa da sua composição química, o biodiesel pode interagir com metais e elastômeros. Os materiais recomendados para uso com esses biocombustíveis incluem aço inoxidável, aço carbono, alumínio, elastômeros de polietileno fluorado, polipropileno fluorado e poliamida (MME, 2022). Como seu ponto de fulgor não é alto, o biodiesel não é inflamável em condições normais, podendo ser facilmente transportado, manuseado e armazenado (Biodieselbr, 2011).

O biodiesel possui uma maturidade tecnológica considerada boa, principalmente devido a seu estágio de produção, possuindo um mercado e cadeia de distribuição consolidados, o que traz vantagens econômicas no curto prazo. Caso haja interesse, há a possibilidade de se produzir o biodiesel a partir de fontes renováveis, através da utilização de álcoois renováveis. Porém, provavelmente os custos seriam muito altos, sendo repassados para o valor final do combustível (Carvalho et. al, 2021).

O custo médio do biodiesel (B100) praticado pelos produtores e importadores de derivados de petróleo e biodiesel foi de R\$ 4,56 em maio de 2024 (ANP, 2024b). Estudos apontam que a aquisição de matéria-prima é responsável por cerca de 75% dos custos de produção (Shelare et al., 2023). Como o teor de carbono do biodiesel é semelhante ao combustível convencional, estima-se que as emissões TtW, ou seja, durante a combustão no navio, sejam similares. A quantidade de emissões do WtT, ou seja, geradas pela extração e produção do biodiesel, pode variar, dependendo da matéria-prima utilizada e dos processos de produção (ABS, 2021).

Os SVO, são amplamente produzidos e comercializados no Brasil (Szklo et al., 2020). A utilização de SVO em embarcações ainda está em fase de pesquisa e testes. A mistura contendo 20% v/v de SVO com diesel é satisfatória, não exigindo modificações nos sistemas dos motores. Além disso, um pré-aquecimento na faixa de 55 a 85°C possibilita o uso de 30% a 60% v/v de SVO, sem necessidade de alterações nos sistemas. Estudos indicam que a mistura de SVO com o combustível fóssil HFO é improvável de ser compatível (CEBRI, 2023). O SVO é utilizado tanto na indústria alimentícia, quanto na produção do biodiesel,

o que pode comprometer sua oferta especificamente ao setor marítimo (Carvalho et al., 2021). Sua acidez é mais alta que os combustíveis tradicionais, podendo causar corrosão nos materiais utilizados. O nível dessa acidez, assim como o biodiesel, dependerá da matéria-prima utilizada na produção. Sua viscosidade também é elevada, o que gera a recomendação de pré-aquecimento do biocombustível (CEBRI, 2023).

Com relação ao HVO, atualmente o óleo de soja é a principal matéria-prima utilizada na produção (Szklo et al., 2020). Possui um teor muito baixo de enxofre e gera poucas emissões de poluentes. Apresenta um número de cetano alto (CEBRI, 2023), o que significa que consegue uma boa combustão, pois quanto maior for o número de cetano de um combustível, melhor será a combustão desse combustível num motor diesel (Biodiesel, 2011). Testes vêm sendo conduzidos com o HVO aplicado em caminhões e carros. Porém, observa-se uma falta de estudos voltados para o setor marítimo (CEBRI, 2023). Devido às suas propriedades físicas e à alta capacidade de produção, o HVO se destaca como um biocombustível atrativo para substituir os combustíveis fósseis futuramente, principalmente no setor aéreo (Carvalho et al., 2021). É um combustível alternativo que necessita de poucas modificações na estrutura portuária e de abastecimento pela semelhança ao diesel marítimo (CEBRI, 2023).

O FT-Diesel demanda menos adaptações a estrutura portuária, pela similaridade ao diesel (CEBRI, 2023), e os coprodutos de alto valor, como diesel rodoviário, nafta, combustível de aviação, podem aumentar a viabilidade das plantas de FT (Carvalho et al., 2021). Apresenta uma viscosidade dentro da mesma faixa dos combustíveis fósseis e um número de cetano superior, o que indica que o combustível oferece um desempenho elevado (CEBRI, 2023). Um estudo realizado demonstrou que FT-diesel tem um potencial de redução de 97% nas emissões em relação ao HFO (Szklo et al., 2020). Porém, embora os componentes individuais do processo FT para a produção do biocombustível sejam bem conhecidos, a integração do processo e demonstração da operação ainda não estão próximos do estágio comercial. Até o momento, esse processo foi demonstrado em plantas piloto. No entanto, diversas iniciativas estão em andamento (CEBRI, 2023).

O ATD utiliza álcoois de base biológica na sua produção. Esse biocombustível tem como vantagens a alta aplicabilidade e maturidade tecnológica. Assim como o FT-Diesel, geram coprodutos de alto valor, resultantes da sua produção, o que pode ser um atrativo para a sua utilização (Carvalho et al., 2021).

Com relação ao Grupo A, a maturidade tecnológica dos biocombustíveis pode variar. O Biodiesel, SVO, HVO e ATD têm maturidade considerada mais alta (Carvalho et al., 2021), e o FT-diesel foi pontuado com desempenho mediano (Carvalho et al., 2021; CEBRI, 2023). Já com relação aos custos, apesar de não serem considerados baratos, principalmente em comparação com combustíveis convencionais e com o biometanol, ainda apresentam custos um pouco menores que outros combustíveis como hidrogênio verde, amônia verde e eletrocombustíveis, principalmente por exigirem menos modificações em motores e modificações ou aumento de tanques de armazenamento. Um estudo demonstrou que comparativamente, os biocombustíveis considerados mais econômicos são SVO, Biodiesel, HVO e ATD. O FT-Diesel, ainda é considerado um pouco mais caro (Carvalho et al., 2021).

#### 4.1.5.2 Grupo B: Biocombustíveis neutros em carbono formados por álcoois e gases liquefeitos

##### 4.1.5.2.1 LNG e Bio-LNG

A utilização do gás natural como combustível de transição no setor marítimo apresenta vantagens significativas na redução das emissões de GEE em comparação com os combustíveis convencionais. No entanto, sua aplicação pode resultar em emissões devido ao vazamento de metano, exigindo uma atenção especial para mitigar esse problema (Speirs et al., 2020). O deslizamento de metano é um fator crítico a ser considerado, pois pode resultar em emissões até 80% superiores às geradas pelo MGO. Estima-se que, durante a produção, essas emissões representem cerca de 1,4% do gás bruto produzido, com a possibilidade de estar subestimado em até 60% (MME, 2022).

O LNG tem ganhado destaque no setor marítimo como combustível de transição, pois não exige a implementação de sistemas complexos (Banaszkiewicz et al., 2020), sendo uma das opções recomendadas pela IMO para reduzir as emissões de GEE. Atualmente são aplicados nos navios em motores *dual fuel* (Tuswan et al., 2023). Empresas que fabricam motores marítimos, como a Wärtsilä e MAN, já possuem motores *dual fuel*, capazes de operar com LNG, Bio-LNG, eletrometano, combustível convencional e biocombustíveis (MAN, 2024b; Wärtsilä, 2024a). Os motores *dual fuel* movidos a LNG operaram utilizando tanto combustível líquido tradicional quanto gás. Nesse caso, o motor utiliza o ciclo Diesel quando opera com o combustível líquido e o ciclo Otto quando funciona apenas com gás. Cada modo de operação gera diferentes níveis de emissões de GEE (ABS, 2021). O LNG também pode ser aplicado em TG e em células a combustível. A regaseificação do LNG pode produzir gás natural que pode ser usado para alimentar células do tipo SOFC (Duong et al., 2024).

Uma desvantagem da utilização desse combustível é que, embora a instalação dos sistemas não seja complexa, são necessárias algumas modificações e um aumento no tamanho do tanque de combustível (Zhao et al., 2021). Uma das soluções para diminuir as emissões de carbono do LNG é utilizar a tecnologia de captura e armazenamento de carbono nos processos que emitem mais, durante a produção, gerando o LNG azul (ABS, 2021).

Embora o número de navios operando com LNG esteja aumentando, é improvável que seja o combustível predominante a longo prazo, pois ainda gera muitas emissões (Al-Douri et al., 2022). O LNG é capaz de eliminar as emissões de SO<sub>x</sub>, porém reduz apenas entre 10 a 20% as emissões de carbono (CEBRI, 2023). Além disso, as regulamentações previstas pela IMO visam eliminar completamente as emissões de carbono (Al-Douri et al., 2022).

Até a metade de 2023, 403 embarcações já utilizavam esse combustível, com 275 terminais no mundo prontos para realizar o abastecimento (CEBRI, 2023). No entanto, a maior parte da infraestrutura de abastecimento está concentrada em poucos portos, majoritariamente situados na Europa (EPE, 2020), apesar de estar avançando para outros locais como Golfo do México, Oriente Médio, China, Coreia do Sul, Japão e Singapura (Tay & Konovessis, 2023). Para que o LNG esteja amplamente disponível globalmente, é necessário investir significativamente na construção de infraestrutura de abastecimento, o que não só exige um custo elevado, mas também um longo período de implementação (Andersson et al., 2020). A infraestrutura de abastecimento do LNG já está tecnologicamente madura, e os procedimentos foram documentados por sociedades de classificação (dos Santos et al., 2022). A grande variação dos preços de LNG entre diferentes regiões do mundo também torna mais difícil a sua adoção de forma mais ampla (EPE, 2020).

Os armadores que planejam utilizar LNG em suas embarcações precisam considerar diversos desafios, como a necessidade de espaço adicional para os tanques de armazenamento, as questões de segurança relacionadas ao manuseio de LNG, a mitigação de riscos durante o abastecimento e os aspectos técnicos associados aos motores de combustão dupla (Tuswan et al., 2023). A composição do LNG é predominantemente metano, e ele é geralmente transportado em tanques criogênicos isolados, mantidos como líquido a temperaturas ligeiramente abaixo de seu ponto de ebulição, aproximadamente  $-161^{\circ}\text{C}$ , e sob pressão atmosférica. É altamente inflamável (CEBRI, 2023) e o Código Internacional de Segurança para Navios que Utilizam Gases ou Outros Combustíveis de Baixo Ponto de fulgor, conhecido como Código IGF, regulamenta a utilização do LNG. Geralmente, os tipos de tanque criogênicos utilizados para transporte são do tipo membrana, tanques prismáticos ou tanques independentes do Tipo C (ABS, 2021).

Os custos de investimento para implementação de LNG em navios pode variar de US\$ 3 a 30 milhões, sendo muito superior ao de embarcações convencionais (EPE, 2020). No entanto, o LNG possui maturidade tecnológica e reduz emissões (Issa et al., 2022).

Já o bio-LNG ou biometano liquefeito, assim como o LNG, possui um número limitado de instalações para abastecimento em todo o mundo. Porém, os processos para produção do bio-LNG são tecnologicamente maduros. Assim como LNG, possuem menor densidade volumétrica que o combustível convencional, necessitando de cerca de 80% mais espaço para armazenamento, além dos custos serem um desafio para aplicação desse biocombustível (Carvalho et al., 2021). Dentre as vantagens do uso do biometano, estão a existência de normas para combustíveis marítimos gasosos e a possibilidade de reduzir potencialmente as emissões de GEE (Carvalho et al., 2021).

A produção atual de bio-LNG não seria capaz de atender a demanda do setor marítimo (dos Santos et al., 2022). O biogás necessário para a produção desse biocombustível é produzido em menor escala, e com custos elevados. Além disso, se considerarmos apenas os custos de produção e distribuição, o bio-LNG não seria capaz de competir com os preços do GNL. Além disso, incluindo o lucro dos produtores de biocombustível, essa competição provavelmente se torna inviável sem incentivos econômicos (Gustafsson & Svensson, 2021).

Porém, segundo a Associação Brasileira de Biogás e Biometano (Abiogás), o Brasil tem potencial de produção do bio-LNG de cerca de 80 milhões de metros cúbicos por dia. Caso isso ocorra, o biocombustível corresponderia a 24% da demanda por energia elétrica do País e a 44% da demanda total de óleo diesel (RCGI, 2023). Apesar de o Brasil vir se destacando por ser o primeiro país a criar um fundo para alavancar os investimentos tanto em biogás, quanto em bio-LNG, o volume produzido atualmente ainda é reduzido, assim como no resto do mundo. No ano de 2022, esse volume no Brasil representou 0,8% do gás natural produzido. A intenção é que no futuro, o Brasil faça parte dos cinco maiores produtores de bio-LNG (Teixeira et al., 2024). O bio-LNG possui uma maturidade tecnológica considerada intermediária (CEBRI, 2023).

A Figura 30 apresenta os potenciais de redução de GEE, medidos em  $\text{CO}_2$ , dos tipos de LNG em comparação com o combustível convencional do tipo *Very Low Sulfur Fuel Oil* (VLSFO), tanto no ciclo Diesel, quanto no Otto.

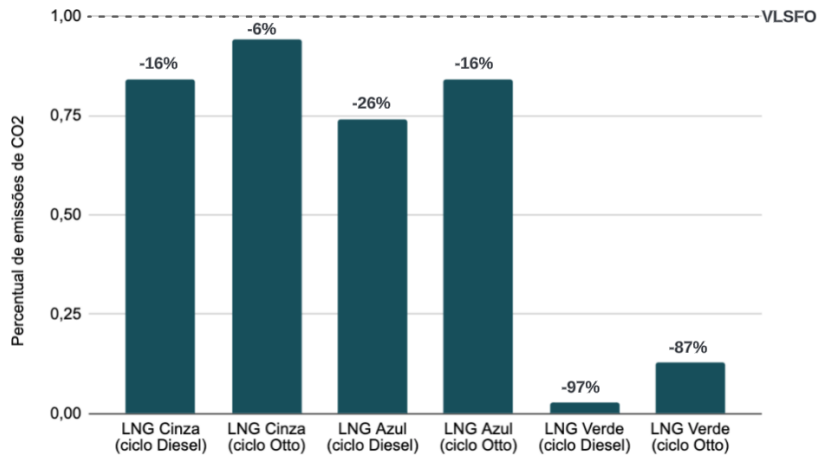


Figura 30: Percentual de redução de CO<sub>2</sub> WtW do LNG comparado ao VLSFO.  
Fonte: Adaptado de ABS (2021).

A aplicação de CCS pode reduzir as emissões do ciclo de vida em 26% em comparação com o VLSFO no caso do ciclo Diesel, e em 16% no caso do ciclo Otto. Essa remoção de CO<sub>2</sub> pode ser a partir dos gases de exaustão ou de combustão dos sistemas de geração de energia ou diretamente da atmosfera. O LNG verde ou eletrometano, reduz em até 97% as emissões no ciclo diesel e 87% no otto (ABS, 2021). O biometano tem um alto potencial, assim como o LNG verde, porém depende da fonte e processo de produção, assim como os outros biocombustíveis. Por exemplo, o biometano obtido a partir de estrume animal pode ter uma pegada de carbono negativa, pois o estrume emite quantidades significativas de metano na atmosfera, e seu uso na produção de biometano elimina essas emissões (Cycle0, 2023). O LNG é considerado mais econômico que o combustível tradicional. Comparando o MDO e o LNG, devido ao maior valor energético do LNG, o custo final para os usuários de LNG pode ser reduzido entre 22% e 26%. O preço médio do LNG cinza para o usuário final era de cerca de 750 euros/tonelada (Orysiak et al., 2024).

#### 4.1.5.2.2 LPG e Bio-LPG

O LPG é um combustível muito empregado em residências, no comércio e na indústria (Kim et al., 2023), e também vem sendo amplamente utilizado em navios (Wang et al., 2024). É considerado um combustível fóssil, composto por gases produzidos na extração e refino de gás natural e petróleo bruto (Kim et al., 2024) e sua composição é basicamente propano e butano. Com relação às emissões, como LPG possui um baixo índice de hidrocarbonetos, produz menos emissões que os combustíveis convencionais, podendo reduzir em cerca de 17% considerando todo o ciclo de vida (Ha et al., 2023; Wang et al., 2024). Por isso, assim como o LNG, vem sendo considerado um combustível de transição. Ele é mais fácil de ser liquefeito que o LNG, necessitando apenas de pressões entre 10 e 20 bar. Além disso, pode ser armazenado por um grande período de tempo, o que facilita o transporte. Porém necessita de armazenamento adequado, com locais ventilados e com materiais apropriados, pois é suscetível a vazamentos e possui alta corrosividade (Wang et al., 2024). Já existem motores *dual fuel* movidos a LPG, capazes de utilizar LPG, Bio-LPG, combustível convencional e biocombustíveis do tipo *drop-in* (MAN, 2024a).

O desempenho do LPG é considerado melhor que o LNG, destacando-se também como um combustível alternativo que auxilia na redução de emissões. Além disso, o LPG é mais eficiente que a gasolina e o diesel em termos

financeiros, reduzindo significativamente os custos com combustível (Kim et al., 2024).

Tanto o LPG, quanto o LNG têm densidades energéticas semelhantes em peso. Além disso, o LPG precisa de uma proporção de ar/gás de 25 para 1 para a combustão, enquanto o LNG precisa de 10 para 1, o que significa que o LPG precisa de uma entrada de ar maior para ter eficiência na combustão. É mais fácil de ser armazenado que o LNG, podendo ser armazenado e transportado como líquido sob pressão em garrafas, cilindros ou tanques de gás. Além disso, o LPG não é composto por um GEE e, portanto, em caso de vazamento, ele se dispersa no ar sem ser tóxico para o meio ambiente (de Jong et al., 2023). O LPG não exige uma conversão complexa para implementação nas embarcações, nem grandes alterações no motor e no sistema de combustível. Assim como o LNG, possui um baixo teor de enxofre (Kim et al., 2023). Porém, tem propriedades inflamáveis e explosivas (Yang et al., 2024).

Já o Bio-LPG ou biopropano, é um biocombustível que pode ser produzido a partir de sete maneiras distintas, onde duas se destacam: o hidrotreamento de bio-óleos, que já é utilizado na produção de cerca de 200 quilos toneladas, e a conversão e síntese gasosa de resíduos celulósicos e orgânicos, com produção tecnicamente viável e potencial de grande disponibilidade de matéria-prima (Johnson, 2019). No caso dos bio-óleos, o processo do óleo vegetal hidrogenado (HVO) produz cerca de 5–10% de bio-LPG (de Jong et al., 2023). Já na segunda forma de produção, as moléculas grandes e complexas da biomassa são decompostas em moléculas menores e mais simples. Essas moléculas menores e mais simples são então sintetizadas/refinadas em combustíveis. Nesse caso, a rota mais promissora para produção do Bio-LPG é a gaseificação e a síntese química (Johnson, 2019). A produção global de LPG é estimada em 300 milhões de toneladas por ano, enquanto a do bio-LPG é menos de 0,1%, ou seja, menos de 300 mil toneladas (de Jong et al., 2023).

A Figura 31 compara as emissões de GEE em CO<sub>2</sub> equivalente, durante o ciclo de vida do LPG em comparação com o HFO.

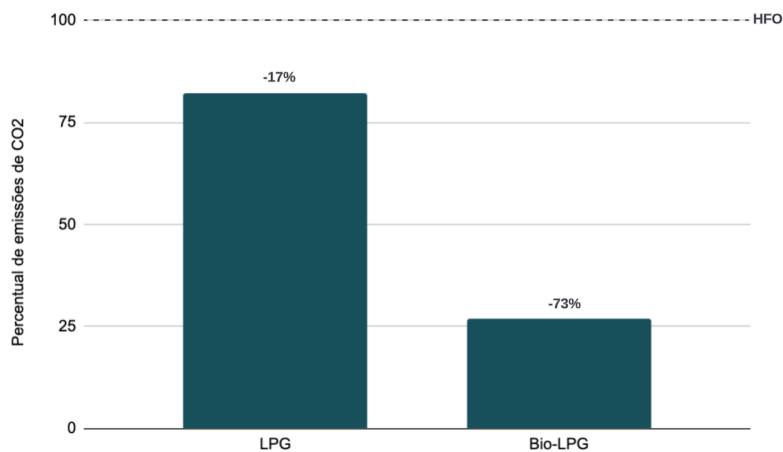


Figura 31: Emissões de CO<sub>2</sub> WtW do LPG em comparação com o HFO ou diesel. Fonte: Adaptado de Kim et al. (2023) e Ha et al. (2023).

Tanto para o LPG cinza, quanto para o Bio-LPG, ou LPG verde, observa-se uma redução de emissões de 18% e 73%, respectivamente, em comparação com o combustível convencional (Ha et al., 2023; Kim et al., 2023). O Bio-LPG, quando aplicado em pequenas embarcações, possui as mesmas propriedades e vantagens do LPG fóssil, com o benefício adicional de ser um combustível alternativo de baixo carbono. Apesar do Bio-LPG ter um potencial maior de



emissões durante a produção, acaba sendo neutralizado, pois não há emissões na fase TtW (Kim et al., 2023).

Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), em 2022 um botijão de 13 kg de LPG no Brasil custava aproximadamente US\$ 18, ou R\$ 94, na cotação da época. O preço estimado do Bio-LPG sem subsídios seria cerca de o dobro desse valor. Para que o bio-LPG ganhe uma participação de mercado significativa, recomenda-se que um esquema de incentivos seja implementado (de Jong et al., 2023).

#### 4.1.5.2.3 Metanol e biometanol (CH<sub>3</sub>OH)

O metanol é um álcool combustível que contém somente um composto de carbono (Wang, Y. et al., 2022). Considerando os combustíveis líquidos, o metanol possui a maior razão de hidrogênio para carbono (MME, 2022), sendo um aliado para a redução de emissões de GEE no setor marítimo (MME, 2022; Wang, Y. et al., 2022). O metanol cinza, a partir de fontes fósseis, quando comparado ao VLSFO, consegue reduzir em cerca de 11% as emissões de CO<sub>2</sub>, se considerarmos apenas as emissões durante a combustão, ou seja, emissões WtT. Se considerarmos todo o ciclo de vida, WtW, o potencial de emitir CO<sub>2</sub> do metanol cinza é maior que o VLSFO, conforme demonstrado na Figura 32 (ABS, 2021).

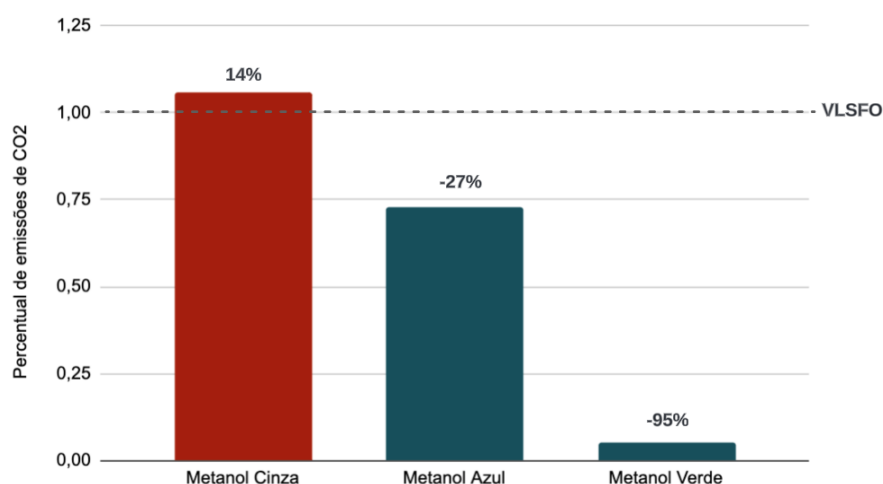


Figura 32: Percentual de redução de CO<sub>2</sub> WtW do metanol em comparação ao VLSFO. Fonte: Adaptado de ABS (2021).

Observa-se que dependendo da fonte de matéria-prima o metanol pode apresentar diferentes níveis de emissão de carbono, podendo ser maior que o combustível convencional, como é o caso do metanol cinza. Já o metanol azul, proveniente do metanol cinza, com captura de carbono, tem um potencial de redução de 27%. O eletrometanol, ou metanol verde, apresenta um potencial de 95% de redução de CO<sub>2</sub>, assim como o biometanol, dependendo da fonte de matéria-prima e dos processos de produção (ABS, 2021).

Quando produzido a partir de fontes renováveis, como a biomassa, é chamado de biometanol (MME, 2022), podendo reduzir amplamente as emissões de CO<sub>2</sub> (Zhao et al., 2021), e sendo visto como um biocombustível potencialmente neutro em GEE (MME, 2022). O biometanol possui custos reduzidos (Mukherjee et al., 2020), sendo considerado o combustível verde mais econômico (Carvalho et al., 2021). O preço do biometanol é quase a metade do preço do bioetanol (Eichler et al., 2015). Além de possuir um custo competitivo com o metanol proveniente de combustíveis fósseis (Fivga et al., 2019). O preço do metanol em novembro de 2023 era de cerca de 550 dólares por tonelada (Biodieselbr, 2023a).

Como o metanol tem 0,792 g/ml (Neves, 2020), o valor equivalente ao litro de metanol é de US\$ 0.44, o que na cotação de abril de 2024 equivale a aproximadamente R\$ 2,25 por litro. Porém, ainda há uma necessidade de maior desenvolvimento da produção de biometanol a partir de biomassa (CEBRI, 2023).

A principal restrição do metanol está vinculada à sua produção, que atualmente é majoritariamente dependente de recursos de origem fóssil (dos Santos et al., 2022), apesar de ainda ser considerado uma das opções mais viáveis (Zhao et al., 2021). A produção do biometanol pode ser realizada a partir de uma ampla variedade de matérias-primas, e a infraestrutura desse biocombustível já está consolidada, principalmente quando a produção é a partir de biometano (Carvalho et al., 2021).

O metanol é utilizado para a produção do biodiesel no Brasil. A demanda brasileira é 100% importada, e somente para a produção do biodiesel é destinado cerca de 32% do total (da Silva et al., 2021). Com relação ao biometanol, a capacidade de produção brasileira só atingiria a necessidade inicial (Eichler et al., 2015). Ainda assim, a nível mundial, o biometanol tem alta disponibilidade, quando comparado a outros combustíveis alternativos (Carvalho et al., 2021).

O metanol ou biometanol enfrentam desafios como sua densidade energética mais baixa, exigindo cerca de duas vezes mais espaço quando comparado ao combustível fóssil convencional (Carvalho et al., 2021). Além disso, apresenta um poder calorífico reduzido (Wang, Y. et al., 2022). No entanto, por ser líquido em condições ambientes de temperatura e pressão, é viável adaptar os tanques com *retrofits* para aumentar a capacidade de armazenamento (MME, 2022). Adicionalmente, a instalação de sistemas de metanol em embarcações é menos complexa do que para o LNG (ABS, 2021). Normalmente os tanques de combustíveis são feitos com aço inoxidável ou aço carbono com revestimentos resistentes ao metanol e tubulação do sistema de combustível de parede dupla (ABS, 2021). Além disso, como é um combustível líquido, não há necessidade de grandes modificações na infraestrutura de abastecimento atual (McCarney, 2020). Essa é outra vantagem do metanol com relação ao LNG, ou outros combustíveis gasosos (ABS, 2021).

Um estudo que comparou diversos combustíveis alternativos, destacou que o biometanol era o mais promissor dentre as alternativas avaliadas. A escolha foi, principalmente, devido ao potencial de expansão desse combustível, maturidade tecnológica de produção e custos menores (Mukherjee et al., 2020). De forma geral, o metanol e o biometanol são considerados alternativas econômicas (Wang et al., 2024), com custos geralmente menores que outros combustíveis alternativos, principalmente devido à infraestrutura consolidada para o comércio (MME, 2022). Os sistemas logísticos para o metanol estão mundialmente desenvolvidos, embora sejam predominantemente aplicados em outras áreas, como a indústria química (Andersson et al., 2020). Devido ao seu amplo uso nessa indústria, a concorrência pode resultar na indisponibilidade deste combustível para a indústria marítima (MME, 2022).

O metanol apresenta alta toxicidade, necessitando de rigorosas medidas de segurança para conter vazamentos e prevenir a exposição humana, pois o contato pode causar irritações e queimaduras na pele (ABS, 2021). Além disso, requer pressurização e possui um alto nível de inflamabilidade, devido ao seu baixo ponto de fulgor (CEBRI, 2023), que é de apenas 11 graus Celsius (ABS, 2021). No entanto, suas propriedades são bem conhecidas, com regulamentos e recomendações estabelecidos para sua utilização (Andersson et al., 2020). Uma vantagem significativa do metanol é sua biodegradabilidade, tornando-o menos prejudicial ao meio ambiente em caso de derramamento, quando comparado aos combustíveis tradicionais (Tay & Konovessis, 2023). O vapor do metanol é mais denso que o ar, portanto, em caso de vazamento, tende a se acumular em áreas baixas. Isso exige a implementação de sistemas eficientes de ventilação e

detecção. Além disso, o metanol é corrosivo, demandando o uso de materiais resistentes e apropriados para seu manuseio (MME, 2022).

A aplicação de metanol em ICE já é possível e a cadeia de suprimentos para produção de metanol verde não possui desafios complexos (Shi et al., 2023). Aliado a boa maturidade tecnológica dos motores *dual fuel* movidos a metanol, com flexibilidade para utilizar tanto metanol, quanto combustível convencional, metanol verde e biocombustíveis do tipo *drop-in*, ele se torna uma opção viável para rápida disseminação no setor marítimo. Até meados de 2023, havia 25 navios operando com metanol como combustível e 127 terminais de abastecimento em todo o mundo. As tecnologias e procedimentos necessários para o uso do metanol foram regulamentados pela IMO e por diversas sociedades de classificação (CEBRI, 2023, Wärtsilä, 2024b).

Considerando o curto prazo, as tecnologias como LNG, LPG e metanol possuem maturidade para aplicação, apesar de ainda necessitar de atenção a questões como armazenamento e reabastecimento (Wang et al., 2024).

#### 4.1.5.2.4 Bioetanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH)

O bioetanol é um álcool normalmente produzido a partir da biomassa por meio de processos de fermentação e destilação. As matérias-primas mais comuns incluem açúcar e amido, geralmente derivados de milho, cana-de-açúcar e trigo (CEBRI, 2023).

O Brasil é o segundo maior produtor, atrás apenas dos EUA (Carvalho et al., 2021), tendo exportado 2,558 bilhões de litros, provenientes da cana e do milho no ano de 2023 (UDOP, 2024). A disponibilidade do bioetanol é alta, e portanto, os preços são baixos em comparação com outros combustíveis neutros em carbono, exceto o biometanol (Carvalho et al., 2021). O preço do bioetanol em abril de 2024 era de cerca de R\$ 4,00 por litro (ANP, 2024c).

Assim como o metanol, é altamente inflamável devido ao seu baixo ponto de fulgor. Sua densidade energética é inferior à dos combustíveis convencionais e possui um baixo número de cetano, o que exige o uso de motores duplo combustível, onde outro combustível é utilizado para iniciar a ignição (CEBRI, 2023). De forma semelhante ao metanol, possui metade da densidade energética do diesel, utilizando o dobro de espaço para armazenamento, e pode ser corrosivo, necessitando de material adequado. Porém, é biodegradável, dissolvendo-se na água, o que gera menos impacto ambiental (Carvalho et al., 2021).

Um estudo feito por pesquisadores da Embrapa Agrobiologia concluiu que, em automóveis, o etanol de cana pode reduzir em 73% as emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera se usado em substituição à gasolina. Quando comparado com o automóvel a diesel, a redução é de 68%. A pesquisa mostra ainda que caso a prática da queima para colheita da cana seja completamente eliminada e toda a colheita seja feita mecanicamente, os valores da redução das emissões alcançarão 82% em relação à gasolina e 78% em relação ao diesel (Ferreira, 2009). No entanto, sua implementação em navios necessita de mais pesquisa e desenvolvimento tecnológico (CEBRI, 2023). Para utilizá-lo em motores diesel, seria necessário um aumento de seu número de cetano e lubrificação, o que poderia aumentar os custos desse biocombustível (Carvalho et al., 2021). A longo prazo, estima-se que o bioetanol venha a ser utilizado, principalmente em células a combustível (CEBRI, 2023).

Atualmente, não há motores disponíveis para aplicação de etanol como combustível. Porém, a empresa Wärtsilä vem buscando soluções para aplicação do etanol como combustível em motores navais (Wärtsilä, 2023b). A maturidade tecnológica do bioetanol como combustível para navios ainda é considerada baixa (CEBRI, 2023).

### 4.1.5.3 Grupo C: Hidrogênio, amônia e os eletrocombustíveis

Para a produção de combustíveis verdes, pertencentes ao Grupo C, é imprescindível aumentar significativamente a geração de energia renovável. Em 2019, a capacidade global de energia solar era de 586 GW e de 651 GW para a energia eólica. No mesmo ano, a demanda do setor marítimo por HFO, MGO e LNG foi de 238 Mt, o que corresponde a 2.749 GW de potência. Considerando que a eficiência para a produção de combustíveis verdes é de aproximadamente 60%, seriam necessários 4.582 GW de energia renovável para produzi-los, o que representa quase quatro vezes a quantidade produzida em 2019. Se essa produção fosse feita exclusivamente a partir de energia eólica, seriam necessárias cerca de 305.000 turbinas eólicas, aproximadamente 13 vezes mais do que havia em operação em 2019. Em 2023, a capacidade instalada de energia solar atingiu 1,4 TW (IRENA, 2024a), enquanto a de energia eólica chegou a aproximadamente 1 TW (IRENA, 2024b). Esses números evidenciam o avanço na produção de energias renováveis. No entanto, considerando a mesma demanda de 4.582 GW, ainda seria necessário praticamente dobrar a capacidade instalada em relação ao que foi produzido em 2023. Esses cálculos referem-se apenas ao setor marítimo; se os combustíveis verdes fossem utilizados em outros setores, a demanda por energia renovável seria ainda maior. Portanto, a produção de combustíveis verdes exigirá um esforço conjunto e integrado da indústria para ampliar a infraestrutura de energia renovável. Apesar do desafio, a adoção desses combustíveis verdes promete trazer inúmeros benefícios ambientais para diversos setores (ABS, 2021).

#### 4.1.5.3.1 Hidrogênio verde (H2 verde)

O hidrogênio, similar à amônia, é um excelente combustível por ser livre de carbono e ter um alto poder calorífico (Wang, Y. et al., 2022). Pode ser obtido a partir de diversas fontes, incluindo combustíveis fósseis, biomassa e água. Atualmente, o gás natural é responsável por 75% da produção global de hidrogênio, seguido pelo carvão com 23%. O petróleo e a eletricidade contribuem com a produção restante (ABS, 2021). No entanto, a produção a partir dessas fontes, sem a utilização de CCS, resulta em emissões adicionais ao meio ambiente, o que não contribui para a descarbonização (IRENA & WTO, 2023). Os combustíveis alternativos produzidos a partir de fontes fósseis podem chegar a gerar emissões de GEE maiores que os combustíveis convencionais (Karvounis et al., 2022). A maior demanda de hidrogênio, cerca de 90%, vem das indústrias químicas e refinarias, que o utilizam como insumo nos seus processos (MME, 2022).

O hidrogênio pode ser empregado em ICE, TG e células a combustível. A utilização do hidrogênio em motores oferece benefícios significativos na redução de emissões de poluentes, desde que seja de origem não cinza (ABS, 2021; Karvounis et al., 2022). Contudo, adaptações nos motores de combustão interna são necessárias, uma vez que não se trata de um combustível do tipo *drop-in* (Carvalho et al., 2021). Além disso, a necessidade de um combustível piloto para a ignição dos motores torna essencial o uso de motores *dual fuel*. Por outro lado, a aplicação do hidrogênio em células a combustível demonstra maior eficiência em comparação aos motores de combustão interna (MME, 2022), sendo considerado o principal combustível para esse uso (Carvalho et al., 2021). No entanto, as células a combustível ainda requerem maior maturidade tecnológica para serem amplamente adotadas no setor marítimo (CEBRI, 2023).

O hidrogênio enfrenta diversos desafios para sua aplicação em navios, como armazenamento, transporte, segurança e custo (Mallouppas & Yfantis, 2021). Possui uma baixa densidade de energia volumétrica em condições ambientes, necessitando de grande espaço de armazenamento, restringindo sua aplicação

em alguns tipos de navios (Van Hoecke et al., 2021). Estima-se que para obter a mesma energia que o óleo diesel marítimo seja necessário cerca de 7 vezes o volume de hidrogênio líquido (DNV, 2022). O transporte de hidrogênio apresenta desafios significativos devido à sua necessidade de ser transportado em forma líquida, a uma temperatura extremamente baixa de  $-253^{\circ}\text{C}$ , utilizando tanques criogênicos do Tipo C. Os materiais empregados devem não apenas suportar essa temperatura, mas também resistir à corrosão causada pelo hidrogênio e evitar a fragilização do aço. Atualmente, estão sendo aplicadas algumas ligas de alumínio e aço inoxidável 316, o que implica em elevados custos de investimento. Além disso, na forma gasosa, o hidrogênio apresenta desafios adicionais de contenção em caso de vazamento, mais complexos comparados a outros gases (ABS, 2021). Portanto, é essencial desenvolver métodos seguros para garantir a contenção adequada, especialmente para mitigar riscos à tripulação (MME, 2022). Devido à sua alta inflamabilidade, também é necessário implementar sistemas de ventilação adequados e diluição com gases inertes (ABS, 2021). De maneira geral, o hidrogênio enfrenta limitações significativas de armazenamento e custos elevados, além de gerar uma quantidade limitada de energia e ter uma produção restrita (CEBRI, 2023). Além disso, a maturidade tecnológica também é um desafio, principalmente quando produzido a partir de fontes de energia renováveis (Carvalho et al., 2021). Se houver avanços tecnológicos, o combustível pode vir a ser mais amplamente utilizado no futuro (Zhao et al., 2021).

Um dos métodos empregados para a produção de hidrogênio é a eletrólise da água, onde a eletricidade é utilizada para dissociar a molécula de  $\text{H}_2\text{O}$  em oxigênio e hidrogênio. Embora esse processo possa ser alimentado por eletricidade proveniente de combustíveis fósseis, quando alimentado por fontes de energia renovável, como solar e eólica, resulta em uma pegada de carbono praticamente nula. Nesse contexto, o hidrogênio gerado é denominado hidrogênio verde (MME, 2022). Outra fonte possível de ser utilizada é a energia nuclear em terra (Andersson et. al., 2020; MME, 2022). A partir dela, é possível utilizar termoquímica ou a eletrólise para produzir hidrogênio. Outras formas de produção incluem a pirólise, gaseificação, biodegradação e micro-ondas (MME, 2022).

A utilização de eletrólise da água, acaba gerando questões a respeito da disponibilidade dos recursos hídricos (Carvalho et. al, 2021), pois um dos problemas da utilização desse método é o aumento da retirada e do consumo de água. Estima-se que conforme a produção do hidrogênio vá crescendo, a retirada de água doce poderá triplicar até 2040 e aumentar em seis vezes até 2050. Um dos relatórios da COP28, aborda orientações para governos e empresas sobre a utilização da água na geração de hidrogênio verde, sugerindo avaliações exaustivas dos riscos e criação de regulamentos sobre o uso da água (IRENA, 2023b). Em contrapartida, há um grande potencial para produção de energia renovável no mundo, o que representa uma vantagem para a produção de  $\text{H}_2$  verde (Carvalho et. al, 2021). Alguns estudos exploram a utilização da eletrólise da água do mar para a produção de hidrogênio (Shi et al., 2023). No entanto, a dessalinização prévia da água é um fator crítico nesse processo, o que representa um desafio significativo (Dokhani et al., 2023). O Brasil é considerado um grande produtor de energia renovável, com capacidade de expansão. Com isso, espera-se que tenha um grande potencial para a produção de hidrogênio verde com custos competitivos. Espera-se que o hidrogênio verde e seus combustíveis derivados, possam ser essenciais para descarbonizar setores complexos, como o setor marítimo (IRENA, 2023a). Com relação ao hidrogênio azul, como a tecnologia de CCS não tem disponibilidade no país, o potencial do Brasil para a produção desse tipo de combustível ainda é considerado baixo (Chantre et al., 2022).

Com relação ao transporte de hidrogênio para comércio, pode ser realizado de formas distintas. Pode ser transportado por longas distâncias, utilizando

gasodutos, ou na forma líquida. As características do hidrogênio fazem com que o transporte seja difícil e tenha custos altos. Por isso, acredita-se que o comércio desse combustível será realizado através de seus combustíveis derivados, como amônia verde e metanol verde (IRENA & WTO, 2023).

A produção de hidrogênio verde ainda é baixa e possui um custo elevado (CEBRI, 2023). Estima-se que o custo necessário para implementar instalações de abastecimento de hidrogênio seja maior do que as de LNG, principalmente pela necessidade maior de armazenamento criogênico de hidrogênio líquido e aos materiais específicos necessários para tanques, tubulações e vedações (ABS, 2021). Além disso, uma das barreiras para a adoção do hidrogênio verde é o seu custo significativamente mais alto em comparação ao hidrogênio cinza. Enquanto o custo do hidrogênio cinza varia entre US\$ 1-4/kg, o do hidrogênio verde varia entre US\$ 6-8/kg. No entanto, o custo do hidrogênio verde já foi reduzido em 50% desde 2015 e espera-se que continue diminuindo. Um valor de US\$ 2/kg tornaria o hidrogênio verde competitivo para utilização em navios (MME, 2022). O barateamento de dois recursos poderiam impulsionar a queda do preço do hidrogênio verde futuramente. O primeiro é o custo da energia renovável. O custo da energia solar caiu quase 90% em 12 anos, e o da energia eólica em torno de 70%, e espera-se que continuem caindo conforme a tecnologia vá avançando. A disponibilidade desse tipo de energia não é um limitador para a produção do hidrogênio verde. O segundo são os eletrolisadores. Estima-se que um efeito de redução semelhante às energias renováveis possa ocorrer. Caso o volume de aplicação dessa tecnologia aumente, assim como avanços no desempenho. Estima-se que haveria uma economia de escala, gerando reduções substanciais. Como esses eletrolisadores podem representar 30 a 40% do custo final do hidrogênio, o custo reduziria consideravelmente, se isso ocorresse (IRENA & WTO, 2023).

A regulamentação e a certificação ainda são obstáculos significativos para a adoção do hidrogênio no setor marítimo. Alguns países estão desenvolvendo regulamentações próprias sobre o hidrogênio, resultando em divergências que podem dividir o mercado global. A cooperação internacional será essencial para superar essas barreiras. Grupos internacionais, como o G7 e o G20, por exemplo, estão trabalhando para o reconhecimento mútuo de certificados, visando facilitar a interoperabilidade regulatória e de mercado, promovendo uma adoção mais ampla e harmonizada do hidrogênio como combustível marítimo (IEA, 2023b). O uso de hidrogênio como combustível marítimo está coberto pelo Código IGF, porém, a IMO ainda não está desenvolvendo requisitos específicos para esse combustível. Sendo assim, o hidrogênio é tratado como um projeto alternativo de acordo com o Código IGF, que necessitará de uma revisão equivalente, com cumprimento de critérios de segurança específicos (MME, 2022). Um estudo com *stakeholders* de empresas, entidades governamentais, associações, universidades e centros de pesquisa na área de hidrogênio no Brasil revelou que, para o desenvolvimento da economia de hidrogênio no país, é crucial implementar políticas públicas eficazes, criar regulamentações específicas para o uso do hidrogênio e fomentar a formação de um mercado robusto. Ações como essas são essenciais para aumentar a confiança das partes interessadas no mercado de hidrogênio de baixo carbono, e impulsionar o setor (Chantre, 2022).

A empresa BeHydro lançou motores movidos a 100% de hidrogênio ou *dual fuel*, podendo utilizar hidrogênio, combustível convencional e biocombustíveis do tipo *drop-in*. Estão disponíveis em 4 versões, com potência entre 1000 e 2670 kWm (Behydro, 2024).

A Figura 33 apresenta o potencial de redução de GEE, medido em CO<sub>2</sub>, dos tipos de hidrogênio em comparação com o VLSFO.

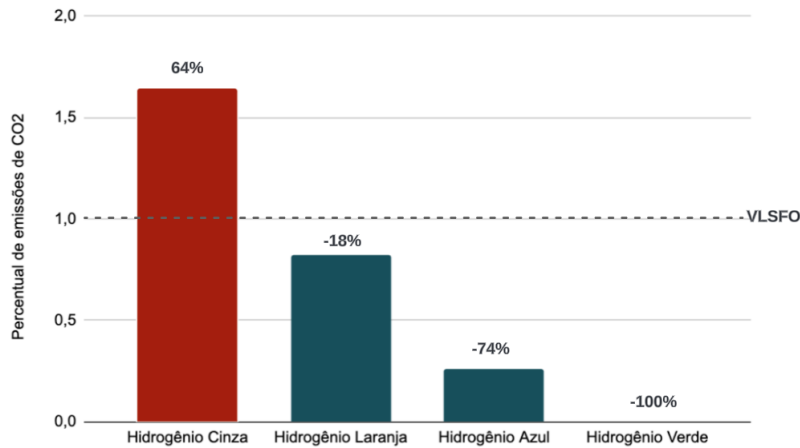


Figura 33: Percentual de redução de CO<sub>2</sub> WtW do hidrogênio em comparação ao VLSFO. Fonte: Adaptado de ABS (2021).

Observa-se que o hidrogênio cinza, produzido a partir de origem fóssil, tem um potencial de gerar mais emissões de CO<sub>2</sub> que o combustível fóssil convencional. Já o hidrogênio laranja, que é produzido a partir de uma mistura de 50% hidrogênio cinza e 50% verde, tem potencial de redução de 18%, e o hidrogênio azul, produzido com captura de carbono, tem potencial de redução de 74% (ABS, 2021). A produção de hidrogênio por eletrólise da água, incluindo a produção do eletrolisador, apresenta diferentes emissões de CO<sub>2</sub> equivalentes. Para a eletrólise alcalina esse valor é de cerca de 0,09 kg CO<sub>2</sub> eq/kg H<sub>2</sub>, já para a eletrólise por membrana trocadora de prótons (PEM) é de 0,009 kg CO<sub>2</sub> eq /kg H<sub>2</sub> (Castro et al., 2023). Como os valores são baixos, para fins gráficos, considera-se que o hidrogênio verde apresenta um percentual de redução próximo a 100% (ABS, 2021). Assim, o uso em maior escala deste combustível é estimada para longo prazo e seu estágio de maturidade tecnológica atual é considerado baixo (CEBRI, 2023).

#### 4.1.5.3.2 Amônia verde (NH<sub>3</sub> verde)

A amônia, junto com o hidrogênio, é um dos dois combustíveis aplicáveis em embarcações que não possuem carbono na molécula (ABS, 2021). O método mais sustentável de produção é a obtenção de hidrogênio através da eletrólise da água do mar com energia renovável e a fabricação de amônia a partir de hidrogênio verde combinado com o processo *Haber-Bosch* (MME, 2022; Shi et al., 2023), que combina o hidrogênio com nitrogênio atmosférico (MME, 2022). Por essa razão, os desafios da produção do hidrogênio também são aplicados a amônia (ABS, 2021). Outras formas de produção vêm sendo pesquisadas com o objetivo de alcançar uma amônia mais ambientalmente amigável e eficaz, principalmente nas áreas de eletroquímica, fotocatalise e biocatalise (Shi et al., 2023).

Em navios, pode ser aplicada em ICE ou em células a combustível (Carvalho et al., 2021). Para aplicação do amoníaco diretamente em ICE, assim como o hidrogênio, há a necessidade de um combustível piloto, devido a uma maior resistência à ignição (Andersson et al., 2020), o que pode aumentar suas emissões (MME, 2022). A amônia possui velocidade de chama menor em comparação com os combustíveis fósseis tradicionais. Portanto, mesmo com a exigência de temperaturas mais altas para iniciar a combustão, a amônia, quando em chama, queima mais lentamente. As tecnologias, materiais e procedimentos para utilização de amônia já são conhecidas, mas para aplicação especificamente em navios ainda são necessários mais avanços (CEBRI, 2023). Atualmente já

existe ICE movido a amônia. O Wärtsilä 25 é um motor marítimo de 4 tempos e velocidade média, disponível em configurações de cilindro de 6L a 9L e com potência variando de 1,7 a 3,4 MW, ideal para uso como motor principal a bordo de navios mercantes menores, barcos de pesca, rebocadores, dragas e embarcações de apoio offshore (Wärtsilä, 2024c; Wärtsilä, 2024d). Sistemas seletivos de redução catalítica (SCR) ou medidas equivalentes são necessários para reduzir as emissões de NO<sub>x</sub>, o que aumenta os custos da instalação (MME, 2022). A empresa Wärtsilä desenvolveu o sistema redutor de NO<sub>x</sub> (NOR) Wärtsilä. O motor é entregue junto com o sistema de fornecimento de gás combustível da Wärtsilä, AmmoniaPac e o redutor de NO<sub>x</sub>, que foram projetados como uma solução integrada e de acordo com os padrões de segurança e regulamentos da sociedade de classificação (Wärtsilä, 2024d). A MAN Energy Solutions também está buscando o desenvolvimento de motores movidos a amônia. A empresa está em fase de testes, e pretende entregar o motor *dual fuel* de dois tempos MAN B&W ME-LGIA para um estaleiro até o final de 2024 (MAN, 2024c).

Para a utilização de amônia em células a combustível, é necessário realizar a quebra de moléculas de NH<sub>3</sub> em H<sub>2</sub>. Para isso, as células a combustível de alta temperatura, como SOFC, precisam ser utilizadas, e essas células ainda possuem baixa maturidade tecnológica (Carvalho et. al, 2021). A perspectiva de utilização desse combustível em células a combustível é estimada para longo prazo (dos Santos et al., 2022). De forma geral, a amônia como combustível não é uma tecnologia totalmente madura, seja para aplicação em ICE ou células a combustível (Carvalho et. al, 2021).

A amônia também pode servir como um transportador de energia para o hidrogênio, pois oferece algumas vantagens. Ela requer menos resfriamento para ser liquefeita, tem uma densidade volumétrica de energia maior do que o hidrogênio e pode utilizar, em certa medida, as infraestruturas de transporte e armazenamento já existentes (IRENA & WTO, 2023).

Em comparação com o hidrogênio, é mais econômica e segura (Shi et al., 2023), possui um poder calorífico 1,7 vezes maior e possui 50 % mais volume de hidrogênio, necessitando de menos espaço de armazenamento (CEBRI, 2023). Ainda assim, requer três vezes mais espaço que o combustível fóssil convencional (Carvalho et al., 2021; DNV, 2022). Esses fatores apontam para a amônia como uma escolha mais apropriada que o hidrogênio (Shi et al., 2023), porém ela ainda está nos estágios iniciais de desenvolvimento para aplicação na indústria marítima (MME, 2022).

Para manter o estado líquido a amônia pode ser armazenada a 25°C sob pressurização de 10 bar ou a -33,4°C sob pressão atmosférica (CEBRI, 2023). Estudos demonstram que as tecnologias utilizadas para lidar com a amônia são semelhantes às empregadas no LPG e, portanto, os sistemas de armazenamento podem ser os mesmos, principalmente para amônia líquida (Machaj et al., 2022). Ele pode ser utilizado tanto para armazenamento, quanto para transporte (MME, 2022). Os tanques de NH<sub>3</sub> podem ser do Tipo C ou prismáticos (ABS, 2021). Devido ao volume e peso da amônia, um navio que deseje utilizar esse combustível, possivelmente necessitaria de novo projeto, para conseguir manter a estabilidade do navio. Além disso, a amônia pode ser armazenada abaixo da linha d'água e a localização dos tanques de combustível de amônia não pode ser na camada externa (DNV, 2022).

A amônia tem a vantagem de ser consideravelmente aplicada como matéria-prima na indústria química, principalmente na produção de fertilizantes nitrogenados e em outras aplicações, como refrigeração, mineração, produtos farmacêuticos, tratamento de água, plásticos e fibras, e redução ou remoção de óxidos de nitrogênio (IRENA & WTO, 2023). Isso lhe permite aproveitar parte da infraestrutura existente, com o transporte por navios já estabelecido em escala



global (CEBRI, 2023) e com sistemas logísticos bem desenvolvidos (Andersson et al., 2020). No entanto, a aplicação no setor marítimo sofreria concorrência com esses setores (CEBRI, 2023).

O maior desafio da amônia verde é o alto custo de produção, que é razoavelmente superior ao da amônia cinza. Porém, espera-se que até 2050 os custos sejam mais baixos. Outros desafios encontrados são relacionados ao aumento da produção e disponibilidade (Mallouppas et al., 2022).

A amônia não é inflamável (CEBRI, 2023), mas é corrosiva e tóxica (Carvalho et al., 2021). Quando em alta concentração representa riscos significativos à saúde, e pode até ser letal dependendo da concentração e da duração da exposição (CEBRI, 2023). Além disso, estudos de dispersão da amônia para avaliar os riscos dos possíveis vazamentos são essenciais (Cheliotis et al. em 2021). Por exemplo, caso ocorra vazamento em água, a amônia pode gerar danos ambientais consideráveis, pois se dissolve facilmente, dificultando a capacidade de resposta (MME, 2022). O Código Internacional para a Construção e Equipamento de navios que Transportam Gases Liquefeitos a Granel, conhecido como Código IGC, apresenta requisitos rigorosos para os materiais que podem ser utilizados na contenção da amônia, e para um projeto de planta de forma a reduzir o risco de exposição humana (ABS, 2021). Porém é importante a criação de mais regulamentos que abordem toxicidade, segurança e armazenamento (Mallouppas et al., 2022). A falta de regras e regulamentos claros para o manuseio do amoníaco tem dificultado sua utilização em navios (DNV, 2023).

Atualmente, o preço da amônia cinzenta é estimado em US\$ 230/tonelada. O preço estimado do amoníaco verde seria de US\$ 670/tonelada, ou cerca de três vezes mais caro que o do amoníaco cinza. Se for usada uma mistura de 50% de cinza e 50% de verde (laranja), o preço pode ser reduzido para US\$ 460/tonelada, tornando o custo da amônia competitivo em relação ao VLSFO, que é oferecido atualmente a uma média de US\$ 450/tonelada (ABS, 2021). A Figura 34 apresenta o potencial de redução de GEE, medido em CO<sub>2</sub>, de cada tipo de amônia, em comparação com o VLSFO.

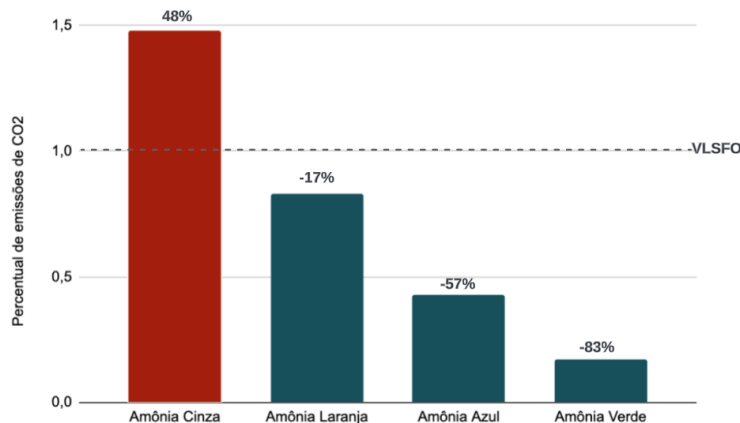


Figura 34: Potencial de redução de CO<sub>2</sub> de cada tipo de amônia, em comparação com o VLSFO.

Fonte: Adaptado de ABS (2021).

A amônia cinza, produzida a partir de fontes fósseis, tem um potencial de emissão de CO<sub>2</sub> 48% maior do que o combustível convencional. Já a amônia laranja, que é produzida a partir de uma mistura de 50% amônia cinza e 50% verde, tem um potencial de redução de CO<sub>2</sub> de 17% e a azul, utilizando captura e armazenamento de carbono, de 57%. A amônia verde tem um potencial de redução de 83%, que não é maior devido a utilização de combustível convencional

piloto para a combustão e geração de outros poluentes, como os gerados pelo combustível de ignição e N<sub>2</sub>O que foram contabilizados em CO<sub>2</sub> (ABS, 2021).

Espera-se que a produção de amônia verde cresça a partir de 2025, tornando-se um importante meio de transporte de energia renovável entre continentes (IRENA & WTO, 2023). Paralelamente, prevê-se um aumento em navios operando com amônia futuramente. Cerca de 58 navios já foram encomendados como "prontos para amônia", o que significa que já estão preparados para uma futura conversão para a utilização de amônia como combustível (DNV, 2023).

#### 4.1.5.3.3 E-diesel (eletrodiesel)

O eletrodiesel é o mesmo combustível que o FT-diesel em termos de composição química. Assim, possui densidade de energia, aplicabilidade e classificações de segurança consideradas ideais. Além disso, do ponto de vista de impacto ambiental, o e-diesel é um combustível que gera emissões de GEE muito baixas ou quase nulas considerando WtW. Sua principal desvantagem é o aspecto econômico, com custos de produção elevados (Carvalho et al., 2021). Os custos estimados do e-diesel são de cerca de cinco vezes os preços do HFO (Szklo et al., 2020).

Assim como amônia verde, pode ser produzido a partir do hidrogênio. A produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis enfrenta atualmente custos altos e desafios técnicos consideráveis. Além disso, caso não seja produzido a partir de hidrogênio verde, terá de provir de CCS, que é o processo de captura, transporte e armazenamento de CO<sub>2</sub> residual de diferentes fontes (indústrias, refinarias e usinas de conversão de biomassa, por exemplo) ou *Direct Air Capture* (DAC), que representa a captura de CO<sub>2</sub> diretamente da atmosfera para produzir um fluxo concentrado de CO<sub>2</sub>. Ambos os processos não estão atualmente disponíveis em larga escala (Carvalho et al., 2021).

#### 4.1.5.3.4 E-LNG (eletrometano)

O eletrometano é quimicamente idêntico ao biometano ou bio-LNG. Portanto, muitas das classificações do bio-LNG também se aplicam ao e-LNG. Além disso, similar ao e-diesel, o e-LNG possui desafios relacionados ao custo e a disponibilidade de matéria-prima, novamente, hidrogênio verde ou CO<sub>2</sub> a partir de CCS ou DAC (Carvalho et al., 2021).

É tecnicamente possível produzir LNG verde, como eletrometano ou biometano, e a redução de emissões de carbono é superior ao LNG cinza e azul. Porém, como a demanda energética para a sua produção a partir do hidrogênio é muito alta, a produção só será economicamente viável e atrativa, se os custos de produção, principalmente da energia renovável, forem reduzidos. A diferença no preço das toneladas demonstra que o LNG verde é menos atrativo que o amoníaco verde (ABS, 2021). Levando em consideração o custo médio global da eletricidade renovável eólica de US\$ 0,053/kWh, uma eficiência de eletrólise da água em torno de 60% e um custo de produção de US\$ 4/kWh, o preço do LNG verde pode ser estimado em US\$ 1.782/tonelada, em comparação com os US\$ 240/tonelada do LNG cinza (ABS, 2021).

#### 4.1.5.3.5 E-metanol (eletrometanol)

O eletrometanol possui a mesma composição molecular do biometanol, e portanto, ambos são similares dentro das classificações. Da mesma forma que os outros e-combustíveis, o enfrenta limitações referentes à disponibilidade de

matérias-primas, ou seja, hidrogênio verde ou CO<sub>2</sub> proveniente de CCS ou DAC, e desafios técnicos (Carvalho et al., 2021).

Quando comparado com o hidrogênio e a amônia, o metanol verde é uma escolha mais fácil para a indústria marítima. Como o metanol contém carbono em sua molécula, combinar com CCS possibilita a criação de um ciclo de carbono considerado fechado, onde o CO<sub>2</sub> capturado pode ser reutilizado na sua produção (Shi et al., 2023). A produção do eletrometanol, assim como dos outros eletrocombustíveis, ainda é limitada. Porém, possui custos de manuseio mais baixos, o que diminui a complexidade da infraestrutura de armazenamento e abastecimento em portos (MME, 2022). Em comparação com o e-diesel e o e-LNG, espera-se que os custos de produção sejam um pouco menores (Carvalho et al., 2021).

Os combustíveis alternativos, como o LNG e o metanol, vem se destacando e oferecem algumas opções para descarbonização no futuro a partir de fontes renováveis. O aumento na quantidade de navios para utilização do LNG demonstra que esse combustível apresenta vantagens no curto prazo. Além disso, pesquisas mostram que em torno de 60% dos projetos novos de redução de emissões em navios, são para utilização de metanol e amônia de baixa emissão (Shell, 2023).

A Figura 35 apresenta um comparativo do volume dos principais combustíveis alternativos e convencionais para gerar a mesma quantidade de energia. Esse volume está relacionado com a necessidade de espaço a bordo.

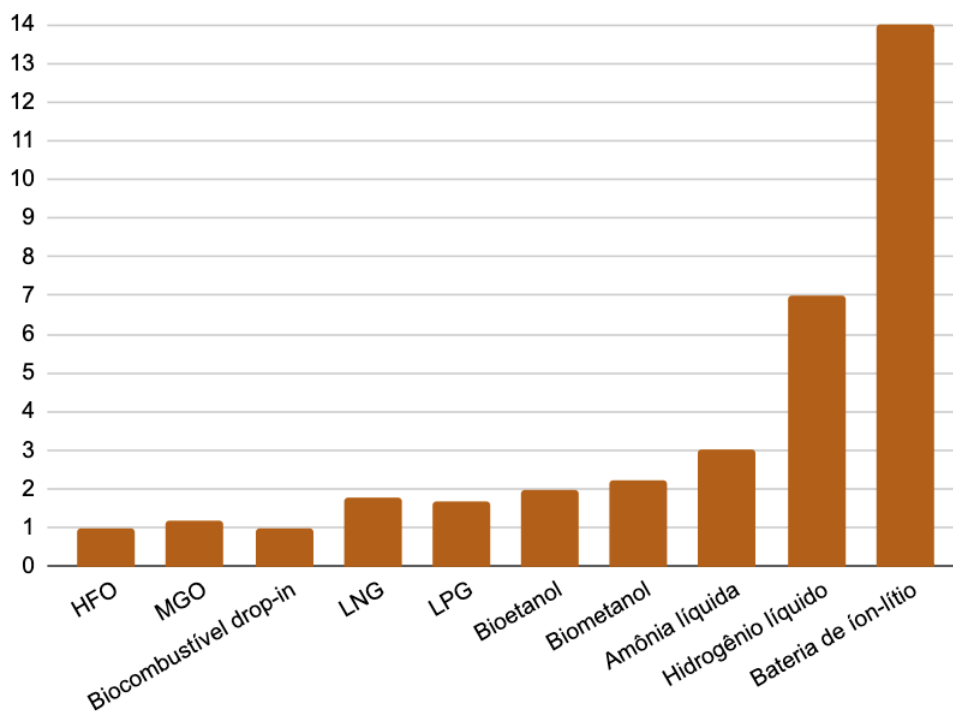


Figura 35: Volume dos principais combustíveis alternativos e tradicionais.

Para efeito de comparação gráfico, o volume dos biocombustíveis do tipo *drop-in* foi equiparado ao do HFO, uma vez que a densidade energética desses combustíveis é próxima do HFO e o MGO (CEBRI, 2023). Com relação ao etanol foi estimado que necessita de cerca do dobro de espaço dos combustíveis fósseis convencionais, pois possui cerca de metade da densidade energética (Carvalho et al., 2021). As células a combustível não foram acrescentadas, pois dependem do combustível utilizado. Além disso, estima-se que a necessidade de espaço real

---

a bordo para o LNG, LPG e hidrogênio possa ser ainda maior do que a representada no gráfico de volume (Lindstad, 2018).

A Tabela 8 apresenta um resumo dos combustíveis alternativos, considerando aspectos como disponibilidade, maturidade tecnológica, densidade, custos, segurança e potencial de redução de emissões. Ela foi elaborada para facilitar a compreensão e comparação entre os combustíveis, auxiliando na escolha da alternativa mais adequada.

Tabela 8: Quadro resumo dos principais combustíveis.

<b>Combustível Alternativo</b>	<b>Disponibilidade</b>	<b>Maturidade Tecnológica</b>	<b>Densidade</b>	<b>Custos</b>	<b>Segurança</b>	<b>Potencial de redução de emissões e Sustentabilidade</b>
<b>Biocombustível drop-in</b>	Mundialmente tem uma disponibilidade considerada baixa. No Brasil possui um potencial maior de disponibilidade, principalmente o biodiesel.	Possuem boa maturidade tecnológica na produção, com exceção do FT-Diesel. Quanto a aplicação, ainda estão sendo realizados testes com misturas desses biocombustíveis. Não são necessárias modificações nos motores atuais.	Considerada boa, próxima ao combustível convencional.	Os custos não são considerados baixos como o do combustível convencional e do biometanol, porém não são altos como amônia, hidrogênio e eletrocombustíveis. Considerado intermediário no comparativo.	São considerados seguros. Não tem alta toxicidade e não são inflamáveis em condições ambientes.	Possuem um bom potencial de redução de emissões, dependendo da fonte de matéria-prima utilizada. Porém, enfrentam desafios relacionados ao uso da terra, principalmente a produção de biomassa, possibilidade de desmatamento e a concorrência com a produção de alimentos.
<b>LNG e Bio-LNG</b>	O LNG tem uma disponibilidade considerada alta no mundo. Porém, a maioria dos portos para abastecimento estão disponíveis na Europa. O Bio-LNG possui baixa disponibilidade.	O LNG possui alta maturidade tecnológica, já sendo utilizado em diversos navios no mundo, com motores desenvolvidos. O Bio-LNG possui maturidade tecnológica considerada alta, com processos de produção conhecidos.	O LNG e Bio-LNG possuem uma densidade energética menor que os combustíveis convencionais, necessitando de cerca de 80% mais espaço para armazenamento.	O LNG é um combustível de baixo custo, normalmente mais baixo que o combustível convencional. O Bio-LNG, assim como os demais biocombustíveis, tem um custo maior, pois não possuem alta disponibilidade, e não conseguiria competir com os custos do LNG cinza. Os altos investimentos no projeto do navio devem ser levados em consideração.	O LNG e Bio-LNG são altamente inflamáveis. Porém, seu manuseio é regulamentado, e tem sido aplicado de forma segura em diversos navios.	O LNG possui baixo potencial de redução de emissões (máximo 20%). O Bio-LNG possui alto potencial, dependendo da fonte de matéria-prima, mas enfrentam desafios comuns aos biocombustíveis, relacionados ao uso da terra.

<b>Combustível Alternativo</b>	<b>Disponibilidade</b>	<b>Maturidade Tecnológica</b>	<b>Densidade</b>	<b>Custos</b>	<b>Segurança</b>	<b>Potencial de redução de emissões e Sustentabilidade</b>
<b>LPG e Bio-LPG</b>	O LPG é amplamente utilizado no setor residencial, possuindo alta disponibilidade. O Bio-LPG, assim como grande parte biocombustíveis, possui baixa disponibilidade.	O LPG possui alta maturidade tecnológica, já sendo utilizado em outros setores e em alguns navios, com motores desenvolvidos.	Tem uma densidade próxima ao LNG, necessitando de quase o dobro do espaço, se comparado ao combustível convencional.	LPG é mais eficiente que a gasolina e o diesel em termos financeiros. O Bio-LPG tem custos mais altos, aproximadamente o dobro do LPG.	O LPG e Bio-LPG são altamente inflamáveis e explosivos. Porém, em caso de vazamento não é um GEE, como LNG.	O LPG possui baixo potencial de redução de emissões (cerca de 17%). O Bio-LPG possui alto potencial, dependendo da fonte de matéria-prima, mas enfrenta desafios comuns aos biocombustíveis, relacionados ao uso da terra.
<b>Biometanol</b>	Mundialmente a disponibilidade é considerada alta, quando comparado a outros biocombustíveis, hidrogênio verde e derivados. O biometanol é normalmente importado no Brasil.	Possui alta maturidade tecnológica para produção. O metanol já é utilizado em diversos navios, com motores desenvolvidos.	Possui uma densidade menor que os combustíveis convencionais, necessitando de cerca de o dobro de espaço.	É considerado um dos combustíveis alternativos com custos mais baixos.	É tóxico e altamente inflamável, devido ao baixo ponto de fulgor. Porém existem regulamentos para manuseio, sendo aplicado em diversos navios. Além disso, é biodegradável.	Possui um bom potencial de redução de emissões,, dependendo da fonte de matéria-prima, mas enfrenta desafios comuns aos biocombustíveis, relacionados ao uso da terra.
<b>Bioetanol</b>	Mundialmente tem uma disponibilidade menor que o biometanol, mas o Brasil é o segundo maior produtor, possuindo alta disponibilidade no país.	Possui alta maturidade tecnológica para produção, porém, não há motores disponíveis para sua utilização no setor marítimo.	Possui uma densidade menor que os combustíveis convencionais, necessitando de cerca de o dobro de espaço.	Tem um custo considerado mediano, não tão baixo quanto o biometanol, porém menores que o hidrogênio verde e seus derivados. A disponibilidade no Brasil colabora com a redução de preços.	É um composto altamente inflamável, com ponto de fulgor baixo, mas dissolve-se facilmente em água e é biodegradável.	Possui um bom potencial de redução de emissões,, dependendo da fonte de matéria-prima, mas enfrenta desafios comuns aos biocombustíveis, relacionados ao uso da terra.

<b>Combustível Alternativo</b>	<b>Disponibilidade</b>	<b>Maturidade Tecnológica</b>	<b>Densidade</b>	<b>Custos</b>	<b>Segurança</b>	<b>Potencial de redução de emissões e Sustentabilidade</b>
<b>Hidrogênio verde</b>	Baixa disponibilidade no Brasil e no Mundo.	Maturidade tecnológica considerada intermediária. Existem motores para utilização, mas por enquanto são aplicados em navios menores. As células a combustível movidas a hidrogênio também já são utilizadas em pequena escala.	Densidade baixa, necessitando de cerca de 7 vezes o espaço de armazenamento de um combustível convencional.	Os custos são considerados elevados, principalmente devido ao uso de energia renovável e os preços dos eletrolisadores.	Possui baixa segurança (inflamável).	Possui alto desempenho em termos de redução de emissões. O hidrogênio verde a partir da eletrólise da água com utilização de energia renovável é capaz de zerar as emissões. No entanto, existem preocupações relacionadas ao uso da água na produção.
<b>Amônia verde</b>	Baixa disponibilidade no Brasil e no Mundo.	Possui maturidade tecnológica considerada intermediária. Já existem motores para utilização de amônia. As células a combustível movidas a amônia necessitam de mais maturidade tecnológica.	Densidade baixa, necessitando de cerca de 3 vezes mais espaço de armazenamento que o combustível convencional.	Os custos são considerados elevados, principalmente devido ao uso de energia renovável e os preços dos eletrolisadores para produção de amônia verde a partir do hidrogênio verde.	Possui baixa segurança e é tóxica.	Possui alto desempenho em termos de redução de emissões, pois, assim como o hidrogênio não possui carbono em sua molécula. Porém, em ICE gera emissões de outros poluentes, como NOx.
<b>Eletrocombustíveis (e-diesel, e-LNG e e-metanol)</b>	Baixa disponibilidade no Brasil e no Mundo.	Possui baixa maturidade tecnológica de produção.	A densidade do e-diesel, e-LNG e e-metanol são similares ao diesel, LNG e metanol, respectivamente, possuindo as mesmas características.	Custos considerados muito altos, devido ao processo de produção a partir de hidrogênio verde, CCS ou DAC, que não estão disponíveis em larga escala. Espera-se que os custos de produção do e-metanol sejam um pouco menores. e-diesel e o e-LNG.	As características de segurança do e-diesel, e-LNG e e-metanol são similares ao diesel, LNG e metanol, respectivamente, possuindo as mesmas características.	Possui bom desempenho em termos de redução de emissões, pois é produzido através de fontes limpas de energia, ou da reutilização de carbono, através de CCS, ou captura de carbono do ar (DAC)

#### 4.1.6 Panorama Atual e Perspectivas Futuras das Tecnologias de Descarbonização no Brasil e no Mundo

Os institutos de pesquisa, as empresas ligadas à indústria naval possuem um papel importante para a área de pesquisa e desenvolvimento de combustíveis alternativos de baixo carbono. Algumas empresas como Neste, BP, Repsol, Galp, Total, Cespa, Honeywell BTG-BTL, TechnipFMC, Fortum e Valmet, já atuam nessa área. Outras empresas, como a Petrobrás, pretendem começar a produção desses combustíveis (CEBRI, 2023).

O BNDES, em apoio ao programa RenovaBio, criado pela Lei Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, que instituiu a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) visando ampliar a produção e o uso de biocombustíveis na matriz energética brasileira (BRASIL, 2017), está apoiando com recursos financeiros empresas produtoras de biocombustíveis. A intenção é, além de reduzir emissões de carbono, aumentar a participação de fontes renováveis na matriz energética do Brasil (BNDES, 2022b).

Testes com diferentes percentuais de Biodiesel misturados ao combustível convencional vêm sendo aplicados no setor marítimo. Uma produtora europeia de biodiesel, assim como a empresa M.T.M. *Ship Management*, realizaram testes contendo 30% v/v de biodiesel (B30) (PRIO, 2023). Os testes da M.T.M. *Ship Management* foram concluídos, e os resultados indicaram uma redução de emissões de aproximadamente 31% das emissões do motor principal e 23% do motor auxiliar (MME, 2022). A Transpetro realizou testes em 2022 contendo 10% de biodiesel, considerados satisfatórios (Transpetro, 2023), e em junho iniciou testes contendo 24%, cerca do dobro do percentual utilizado em veículos terrestres no Brasil (14% com projeção de chegar a 15% em 2025), onde espera-se uma redução de aproximadamente 17% nas emissões de GEE (Biodieselbr, 2023b). Já uma empresa de navegação canadense concluiu com sucesso em novembro de 2021, os testes mais longos do mundo de biodiesel 100% v/v (B100) em motores marítimos, acumulando quase 30.000 horas de funcionamento. O B100 foi testado em motores principais e auxiliares e não exigiu nenhuma modificação nos equipamentos existentes. Os testes demonstraram uma redução total de CO<sub>2</sub> de 23%, em comparação com o gásóleo marítimo (MGO), levando em consideração todo o ciclo de vida (CLS, 2021). Em diversos locais do mundo, como na Ásia, são encontrados diversos desafios para a produção de biodiesel, principalmente em virtude dos altos custos de produção de matéria-prima e à baixa disponibilidade de terras, o que faz com que os preços do biocombustível sejam elevados (Shelare et al., 2023).

Referente ao metanol, a Petrobras assinou em 2023 um Memorando de Entendimentos com a empresa dinamarquesa *European Energy*, para avaliação de oportunidades de negócios, com o objetivo de desenvolver futuramente uma planta de e-metanol no Brasil. A *European Energy* é uma empresa dinamarquesa voltada para projetos de energia renovável, como energia solar e eólica, e soluções à base de hidrogênio verde (Petrobras, 2023). Já um estudo da COPPE-UFRJ busca aumentar a produção de eletrometanol, através do CO<sub>2</sub> liberado na fermentação do etanol em combinação com hidrogênio produzido a partir de energia eólica e solar. Dessa forma, a produção poderia ser aumentada em cerca de 40%, sem necessidade de aumentar o cultivo (COPPE, 2022). Motores movidos a esse combustível já foram disponibilizados pelos fabricantes MAN e Wärtsilä. O motor a metanol Wärtsilä 32 opera com metanol, metanol verde, HFO, MDO e biocombustível líquido (Wärtsilä, 2024b). Além disso, a empresa alemã *Helm Proman Methanol* (HPM), que em 2022 detinha cerca de 30 % de participação no mercado brasileiro, com presença nos portos de Santos, Paranaguá e Rio Grande, está investindo em um projeto que junta os governos da



província de Quebec e do Canadá e empresas da área energética para produzir metanol verde. A expectativa é que a primeira etapa da planta esteja pronta para começar a operar até o final de 2023 e passe a transformar 200 mil toneladas de resíduos não renováveis em aproximadamente 100 mil toneladas de metanol a cada ano. A HPM está operando com dois navios 'flex' que podem usar tanto metanol quanto diesel (Biodieselbr, 2022).

A empresa de logística integrada Maersk estabeleceu a meta de atingir emissões líquidas zero até 2040 em todo o seu negócio, e para isso, encomendou 19 navios com motores *dual fuel*, capazes de operar com metanol verde. Para alcançar esse objetivo, realizou parceria com portos e empresas de energia para produção de e-metanol (Maersk, 2023a; Maersk, 2023b). Já existem mais de 100 encomendas de navios habilitados para metanol encomendados em toda a indústria (Maersk, 2023c). A empresa acredita que o metanol verde é a única solução escalável e pronta para o mercado (Maersk, 2022). A Maersk pretende lançar em 2024, o primeiro rebocador de célula a combustível no mundo, que funcionará na região europeia, utilizando metanol verde (Maersk, 2021).

Durante a COP28, o Ministro de Minas e Energia destacou que o Brasil espera atrair mais de R\$ 200 bilhões em investimentos, devido ao seu potencial na produção de biocombustíveis, como o *Sustainable Aviation Fuel* (SAF), o HVO, o etanol de segunda geração, o etanol hidratado e o biodiesel (MME, 2023b). Como o Brasil é o segundo maior produtor de etanol (Carvalho et al., 2021), também durante o mesmo evento, a União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia (UNICA) e a Agência Brasileira de Promoção das Exportações (ApexBrasil) assinaram um acordo que visa promover a utilização do etanol no cenário internacional, buscando posicionar o etanol como opção mais viável para a transição energética nos transportes, colocando o Brasil como referência (UNICA, 2023).

A empresa Wärtsilä assinou um acordo de parceria estratégica para modelagem de descarbonização com a empresa brasileira de energia Raízen. O interesse é na futura introdução marítima do etanol como combustível naval. A Wärtsilä apoiará a Raízen realizando testes de tecnologia com etanol como combustível em um de seus motores de laboratório de combustíveis sustentáveis. A intenção é que os testes sejam realizados no motor próprio para metanol. Estudos iniciais da Raízen estimam que, ao substituir os combustíveis fósseis por etanol, as emissões de CO<sub>2</sub> podem ser reduzidas em até 80% (Forbes, 2023; Wärtsilä, 2023b).

A América do Norte e a Europa assumiram a liderança nas iniciativas para incentivar a produção de hidrogênio de baixas emissões (IEA, 2023b). Os países desenvolvidos têm promovido o hidrogênio verde e a amônia verde como os combustíveis marítimos do futuro, destacando a necessidade de gerar energia sustentável para atender a essa demanda. O Brasil tem um potencial enorme de geração de energia renovável, como hidroelétrica, solar e eólica, e pode vir a ser um grande produtor, consumidor e exportador desses combustíveis (MME, 2022). Atualmente, mais de 30 economias em todo o mundo já têm estratégias nacionais para o hidrogênio com baixo teor de carbono (IRENA & WTO, 2023). Especialmente os países do Sul Global possuem um potencial significativo para desenvolver uma produção sustentável de hidrogênio verde, devido a disponibilidade de energias renováveis, o que pode representar oportunidades futuras para esses países (IRENA, 2023b). No entanto, o alto custo inicial para essa transição é um obstáculo à implementação (EPBR, 2023).

O Uruguai firmou em julho de 2023, um memorando de entendimento com a União Europeia (UE) sobre energias renováveis e hidrogênio verde. A proposta é produzir combustíveis verdes a partir de hidrogênio verde, com foco no mercado europeu. O país dispõe de uma abundante fonte de CO<sub>2</sub> biogênico e planeja utilizar suas usinas de etanol para viabilizar essa produção (UOL, 2023).

A UE, através da iniciativa *Global Gateway* construiu parcerias com uma série de economias, incluindo Brasil, Chile, Quênia, Marrocos, Namíbia, África do Sul e Tunísia, estabelecendo projetos conjuntos de investigação e investimento de produção de hidrogênio verde, alavancando investimentos públicos e privados e capacitação (IRENA & WTO, 2023).

Em setembro de 2023, a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), sediada no Brasil, e a GIZ (*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*), sediada na Alemanha, assinaram um Acordo de Cooperação Técnica (ACT) no âmbito do projeto H2Uppp (*International Hydrogen Ramp-Up Programme*). O estudo desenvolvido tem o objetivo de verificar a preparação da infraestrutura portuária nacional para o recebimento de embarcações que trafegam com combustíveis zero carbono, para o uso e exportação do hidrogênio verde e seus derivados, e para o fornecimento de energia proveniente de fontes renováveis para embarcações atracadas (ANTAQ, 2023b).

O Porto do Açu, localizado no norte do estado do Rio de Janeiro, no Brasil, pretende combinar energia renovável, produção de hidrogênio renovável e consumo industrial no mesmo lugar. O Porto pretende se tornar uma referência em portos que promovem a transição energética no Brasil. Porém o foco do porto está nas indústrias siderúrgica, química e cimenteira (Porto do Açu, s.d).

O Brasil passou a contar em 2023 com mais uma entidade voltada para o desenvolvimento das fontes de energia renovável, a Associação Brasileira de Hidrogênio e Combustíveis Sustentáveis (ABHIC). A entidade nasce com objetivo de fomentar os setores de hidrogênio e de combustíveis sustentáveis no país, contribuindo com a regulamentação e a estruturação do mercado (Hein, 2023). A empresa Unigel anunciou um projeto para produção do hidrogênio verde na Bahia que terá capacidade de produzir 100 mil toneladas anuais de hidrogênio verde até 2027. A intenção é produzir hidrogênio e amônia verde para várias indústrias, incluindo transporte (Unigel, 2023).

A ABHIC firmou parceria com a Associação Alemã de Hidrogênio e Células a Combustível (DWV), que atua desde 1996 pela indústria sustentável de Hidrogênio na Alemanha, o maior mercado consumidor de Hidrogênio no mundo. A empresa, que busca o desenvolvimento do Mercado de Hidrogênio e Derivados no Brasil, informa que considera essa parceria um marco para o mercado brasileiro (ABHIC, 2024). Além disso, a Agência Alemã de Cooperação Internacional anunciou investimento de alto valor para o desenvolvimento de hidrogênio verde no Brasil, com financiamento para a construção de uma planta piloto de eletrólise com capacidade de 5 MW (MME, 2022). Segundo o relatório *ClimateScope 2023* da BloombergNEF, em 2023 o Brasil era o quinto país no mundo mais atrativo para investimento em energia renovável, e o segundo da América Latina (Mitri et al., 2023).

A Voltalia, empresa produtora de energia renovável, o Governo de Pernambuco e o Complexo Industrial Portuário de Suape estabeleceram em 2023 um Memorando de Entendimento para estudos de projeto de Hidrogênio Verde no estado. A empresa possui cerca de 1,4 GW de potência provenientes de plantas de energia solar e eólica em operação, e mais 7 GW de potência previstos a partir de projetos em desenvolvimento, a maior parte no Nordeste. A intenção é utilizar essa energia para ingressar no mercado de hidrogênio verde e seus derivados (SDEC, 2023).

O Brasil, através do MME, assinou duas declarações durante a COP28. A primeira que busca o reconhecimento mútuo de sistemas de certificação de hidrogênio dos diversos países e a segunda com o objetivo de propor ações públicas e privadas para desenvolvimento do comércio internacional de hidrogênio. O Brasil já é membro do Fórum Internacional sobre Comércio de Hidrogênio (MME, 2023c).

A China se tornou o país líder na produção de eletrolisadores, necessários para a produção de hidrogênio verde por fontes renováveis. Em 2022, sua participação em eletrolisadores era 30%, incluindo o maior projeto de eletrólise do mundo, com 150 MW. Os fabricantes de eletrolisadores anunciaram planos para uma maior expansão, com o objetivo de atingir a capacidade de 155 GW de potência por ano até 2030 (IEA, 2023b).

Navios com células a combustível a hidrogênio já estão disponíveis no mundo (Energy Observer, 2024; IEA, 2023b). Além disso, o hidrogênio começou a ser implementado em motores de combustão interna. O Hydrotug 1, rebocador lançado em dezembro de 2023 na Europa, é o primeiro rebocador do mundo movido por motores de combustão que queimam hidrogênio e combustível tradicional. Utiliza motores duplos de média velocidade, cada um fornecendo 2 megawatts, resultando numa redução global de 65% do consumo de combustível tradicional. Esse rebocador pode armazenar 415 kg de hidrogênio comprimido em 6 estruturas de armazenamento instaladas no convés (Behydro, 2023).

A Wärtsilä lançou a primeira solução disponível comercialmente para o setor marítimo para uso de amônia como combustível. Trata-se do motor de 4 tempos com tecnologia duplo combustível denominado Wärtsilä 25. Segundo a empresa, ele é perfeito para uso como motor principal a bordo de navios mercantes menores, barcos de pesca, rebocadores, dragas e embarcações de apoio offshore, com potencial de reduzir imediatamente as emissões de GEE em um mínimo de 70% em comparação com um motor diesel (Wärtsilä, 2024e). Além disso, a Wärtsilä e a Eidesvik, empresa de embarcações para operações *offshore* e energia eólica, são parceiras no projeto *ShipFC*, financiado pela UE, para equipar um navio com uma célula a combustível de 2 MW utilizando amoníaco verde (Wärtsilä, 2021). A instalação do sistema de células a combustível movido a amônia está previsto para acontecer ainda em 2024, e com isso, esse navio se tornará o primeiro a navegar longas distâncias sem emissões de GEE (Eidesvik, 2020).

O programa *FirstBio2Shipping*, desenvolvido por empresas holandesas, é um projeto pioneiro no campo do Bio-LNG. Este projeto está próximo de produzir o primeiro lote de bio-LNG destinado ao setor marítimo. A planta, uma vez em operação, deverá gerar aproximadamente 2.400 toneladas de bio-LNG por ano (Habibic, 2024). As fabricantes Wärtsilä e MAN possuem motores navais *dual fuel* para a utilização de LNG (MAN, 2024b; Wärtsilä, 2024a).

O LPG também já possui sistemas e motores *dual fuel* disponíveis. Em 2018, a fabricante de motores *MAN Energy Solutions* criou o MAN B&W ME-LGIP, o primeiro e único motor *dual fuel* do mundo com injeção de gás líquido que permite alternar entre combustíveis convencionais HFO, MGO, LPG e Bio-LPG (MAN, 2024a). Em 2018 a Wärtsilä realizou testes em escala real do seu Sistema de Fornecimento de Combustível LPG, o *LPG Fuel Supply System* (LFSS) (Wärtsilä, 2024f). O LFSS atua como sistema integrador (Wärtsilä, 2022).

Com relação ao uso de baterias, atualmente há 158 aplicações de BESS em balsas para carros e passageiros, 52 em cruzeiros e iates, 142 em Offshore e submarinos, 78 em navios mercantes e 186 em equipamentos portuários/estações costeiras (He et al., 2024). Já os WASP foram instalados em 28 navios de grande porte até 2023 (DNV, 2023).

A energia nuclear é normalmente encontrada em navios militares, principalmente submarinos, e em quebra-gelos na região do Ártico, particularmente na Rússia. A intenção é permitir que a navegação e o transporte possam ocorrer durante o inverno (Bhattacharyya et al., 2023). Atualmente, todos os porta-aviões e submarinos dos EUA são movidos a energia nuclear (World Nuclear Association, 2023). Os EUA, Reino Unido, França, Rússia, China e Índia têm marinhas com aplicação de energia nuclear (Bayraktar & Pamik, 2023).

A empresa Fincantieri, sediada na Itália e especializada na construção naval de diversos tipos de navios, incluindo navios de guerra (REUTERS, 2024), anunciou que vários fornecedores estão atualmente desenvolvendo novos protótipos de tecnologia nuclear para embarcações, com estágios de maturidade diferentes. A empresa acredita que leve em torno de uma década esses protótipos sejam viáveis para o setor marítimo (Saul, 2023).

O Brasil vem avançando em projetos de energia nuclear. O Programa Nuclear da Marinha (PNM) foi iniciado em 1979 com o objetivo de dominar o ciclo do combustível nuclear e criar uma usina de geração de energia elétrica com tecnologia nacional. Em 1988, alcançou-se o desenvolvimento do reator IPEM-MB/01 e a capacidade de enriquecimento de urânio. Atualmente, o PNM está construindo um protótipo em terra para uma planta de propulsão nuclear naval, visando concluir a instalação no primeiro Submarino de Propulsão Nuclear (AMAZUL, 2022). O modelo de reator a ser empregado nos submarinos nucleares e desenvolvido pela MB é o PWR (reator de água pressurizada) (BRASIL, 2024d). Com o PNM e o Programa de submarinos (PROSUB), o Brasil conquistará a capacidade de projetar, construir, operar e manter submarinos com propulsão nuclear, competências detidas atualmente por apenas cinco países: EUA, Reino Unido, França, Rússia e China (Amazul, 2020).

## **4.2 Resultado do Estudo de Caso**

As subseções apresentam os resultados obtidos de cada passo do estudo de caso, segundo descrito na Seção 3 procedimentos metodológicos.

### **4.2.1 Contato formal com a organização e explanação dos objetivos do estudo (Passo I)**

A MB foi contactada, foi realizada uma apresentação sobre o tema e objetivos do estudo em 16 de novembro de 2023 e enviado um relatório sobre o projeto.

### **4.2.2 Seleção do Objeto de estudo e dos especialistas a serem entrevistados (Passo II)**

#### **4.2.2.1 Objeto de estudo**

O Navio de Guerra selecionado para o estudo de caso foi o Navio Patrulha de 500 toneladas de deslocamento, o NPa-500MB. Ele é um navio de guerra menos complexo do que uma Fragata e com requisitos mais simples (Oliveira, 2023). Seu desenvolvimento está em andamento por meio de um Acordo de Cooperação Técnica (ACT) entre a Empresa Gerencial de Projetos Navais (EMGEPRON) e a MB, com a participação ativa da Diretoria Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha (DGDNTM) e do Centro de Projetos de Sistemas Navais (CPSN) (Wiltgen, 2023). Está previsto que opere com motor a diesel, utilizando MGO (Padilha, 2016).

A colaboração entre essas organizações busca executar o projeto de construção deste navio, se comprometendo com o fornecimento de um navio eficiente e alinhado com as demandas da MB. Além disso, com esse projeto espera-se que a MB obtenha e amplie suas capacidades em projeto, construção, operação e suporte de navios com alto grau de complexidade técnica. Esse ACT terá um papel essencial na retomada da construção de navios pela MB. O NPa-500MB é um projeto de navio *offshore*, certificado por uma Sociedade Classificadora reconhecida pela *International Association of Classification Societies* (IACS), o que demonstra o compromisso com padrões internacionais de

qualidade e segurança (Wiltgen, 2023). A aplicação de combustíveis alternativos, dos pontos de vista comercial, segurança e econômico, pode ser mais eficaz e atrativo se for planejado na fase de projeto de embarcações, que é o caso do NPa-500MB. Os tanques de combustível, por exemplo, serão especificados de acordo com o combustível que será utilizado (ABS, 2021).

O NPa-500MB será utilizado para operações estratégicas em áreas de acesso restrito, atuando como centros de comando e controle, integrando grupos-tarefa ou operando de forma independente. Suas atividades incluem defesas antiaéreas, ações de superfície, patrulha naval em águas jurisdicionais brasileiras, inspeção naval, busca e salvamento, e enfrentamento a novas ameaças, como terrorismo, pirataria, contrabando, poluição marinha e tráfico de drogas, armas e pessoas (Padilha, 2016). Portanto, é um navio voltado para patrulhar áreas brasileiras, podendo realizar viagens mais curtas. A Figura 36 apresenta o navio com seus principais sistemas.



Figura 36: Navio NPa-500MB.  
Fonte: SISNAVAL (2021).

O desenvolvimento do projeto está em consonância com os padrões de navios militares internacionalmente reconhecidos, o que demonstra um potencial para exportação para outras marinhas (Padilha, 2016). Essa classe de navio é muito demandada por marinhas de outros países, principalmente aqueles que possuem uma área costeira extensa, como o Brasil (SISNAVAL, 2021).

Tanto na concepção e construção do NPa-500MB destinado à MB, como no contexto de possíveis exportações, é essencial que a Marinha esteja plenamente alinhada com as crescentes demandas de descarbonização globais. Em um cenário onde a minimização do impacto ambiental tornou-se uma prioridade global, ao incorporar tecnologias voltadas para a sustentabilidade e reduzir ou eliminar emissões, o NPa-500MB não apenas atende às exigências presentes, mas também antecipa e se prepara para as futuras normativas ambientais. Dessa forma, ao promover um compromisso proativo com a descarbonização, a MB não apenas contribui para a preservação ambiental, mas também estabelece seu navio-patrulha como um modelo de referência internacional, aumentando suas chances de sucesso não só no cenário nacional, mas também no mercado internacional. A Tabela 9 apresenta as características técnicas do NPa-500MB.

Tabela 9: Características técnicas do NPa-500MB.

Dimensões	
Comprimento Total	58,9 metros
Comprimento entre perpendiculares	55,2 metros

<b>Dimensões</b>	
Boca Máxima	9,0 metros
Calado Máximo	2,5 metros
Pontal	5,2 metros
Altura do mastro	10,4 metros
<b>Deslocamento</b>	
Deslocamento carregado	564 toneladas
Deslocamento leve	455 toneladas
Deslocamento padrão	498 toneladas
<b>Velocidades</b>	
Velocidade Máxima Mantida	21,7 nós
Velocidade de Serviço	13 nós
<b>Propulsão</b>	
Diesel Simples	2 motores com 2 linhas de eixo
<b>Raio de Ação</b>	
A 13 nós (Velocidade de Serviço)	3.000 milhas náuticas
<b>Autonomia</b>	
No mar (operação contínua)	20 dias
<b>Capacidade</b>	
Tripulantes	35
Destacados (extras)	8
% de acomodações específicas para tripulação do gênero feminino	27%
<b>Estrutura</b>	
Casco	Aço
Superestrutura	Alumínio
<b>Capacidade de Energia</b>	
Geradores principais	2 geradores (300KW)
Gerador de emergência	1 gerador (163KW)
<b>Sensores</b>	
Tipos	Alça optrônica Radares de busca combinada Radar de navegação
<b>Armamento</b>	
Tipos	Canhão de calibre até 40mm 2 metralhadoras com coneteira e elevação automáticas

Fonte: Adaptado de Padilha (2016).

#### 4.2.2.2 Seleção dos especialistas a serem entrevistados

Os especialistas para apresentação e seleção das tecnologias foram selecionados nas seguintes Organizações Militares (OM) da MB: Diretoria Industrial da Marinha (DIM), Diretoria de Engenharia (DEN) e Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro (AMRJ). Elas fazem parte das organizações responsáveis tanto pelos projetos, quanto pela execução de construções navais e possíveis modificações técnicas.

A DIM é responsável pelo planejamento e coordenação dos programas e projetos de manutenção dos sistemas e navios. Além disso, atua na supervisão executiva dos serviços industriais de construção de embarcações da MB. O AMRJ gerencia e executa programas de construção, manutenção e reparo de navios da MB. A DEN realiza atividades normativas, técnicas e de supervisão de engenharia naval em diversas áreas, como "Estrutura Naval", "Sistemas de Propulsão", "Sistemas de Governo", "Sistemas Auxiliares", "Sistemas de Gestão de energia", "Combustíveis e lubrificantes", dentre outras. A Tabela 10 apresenta a especialidade e conhecimentos técnicos dos especialistas.

Tabela 10: Dados dos especialistas selecionados.

Especialista	Organização Militar	Anos de experiência na área	Área em que atua
1	DIM	46	Gerencial e técnica

Especialista	Organização Militar	Anos de experiência na área	Área em que atua
2	DIM	14	Gerencial e técnica
3	DEN	9	Técnica
4	AMRJ	27	Técnica

Como os especialistas trabalham em diferentes departamentos da MB, possuindo ampla experiência na indústria marítima, principalmente navios de guerra, abrangendo as áreas de construção, *retrofit*, operação e gerenciamento, os dados coletados foram considerados relevantes e aceitáveis para este estudo. Estudos demonstram que quatro a cinco entrevistados são suficientes para definição dos critérios e avaliação das soluções propostas quando os participantes têm experiência no tema da pesquisa (Romney et al., 1986).

#### 4.2.3 Definição de critérios para acesso à organização e aos documentos, quais são confidenciais e quais podem ser divulgados (Passo III)

O acesso à organização foi facilitado pela MB e não foi necessária a utilização de documentos confidenciais. Os documentos estavam disponíveis na literatura e podem ser divulgados.

#### 4.2.4 Seleção de tecnologias a partir da Revisão da Literatura (Passo IV)

A seleção de tecnologias foi dividida em duas etapas. A primeira é referente ao tipo de propulsão a ser escolhida: mecânica, elétrica ou híbrida, ou seja, a melhor solução de propulsão (SP), que abrange uma combinação de tecnologias. A Tabela 11 apresenta as possíveis SP.

Tabela 11: Soluções de propulsão.

Identificação da solução	Descrição
<b>Mecânica</b>	
SP1	ICE
<b>Elétrica</b>	
SP2	Bateria (BESS) com ou sem supercapacitor
SP3	Células a combustível + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (ESS)
SP4	Energia eólica + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (ESS)
SP5	Energia solar + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (ESS)
SP6	Energia eólica + energia solar + bateria(BESS) com ou sem supercapacitor (ESS)
SP7	Células a combustível + Energia eólica e/ou solar + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (EES)
SP8	Energia nuclear
<b>Híbrida</b>	
SP9	ICE + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor
SP10	ICE + célula a combustível + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor
SP11	ICE + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor + energia solar
SP12	ICE + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor + energia eólica
SP13	ICE + célula a combustível + bateria(BESS) com ou sem supercapacitor + energia eólica e/ou solar

Essas soluções tecnológicas serão, posteriormente, avaliadas pelos especialistas selecionados em diferentes critérios, utilizando um método MCDM. Além disso, como o navio selecionado como objeto de estudo utiliza ICE, não serão propostas SP com utilização de TG.

A partir da escolha da SP, será aplicado um método MCDM, para a escolha da solução de combustível apropriada. Essa etapa será realizada apenas se a SP

escolhida envolver a utilização de motor de combustão interna e/ou célula a combustível. A Tabela 12 e a Tabela 13 apresentam as SC para utilização em ICE e em células a combustível (CC), respectivamente.

Tabela 12: Solução de combustível (SC) para ICE.

Identificação da solução	Descrição
SC_ICE 1	biocombustíveis <i>drop-in</i>
SC_ICE 2	Bioetanol
SC_ICE 3	LNG
SC_ICE 4	Bio-LNG
SC_ICE 5	LPG
SC_ICE 6	Bio-LPG
SC_ICE 7	Amônia verde
SC_ICE 8	Hidrogênio verde
SC_ICE 9	Biometanol
SC_ICE 10	Eletrometanol
SC_ICE 11	Eletrometano
SC_ICE 12	Eletrodiesel

Tabela 13: Solução de combustível (SC) para célula a combustível.

Identificação da solução	Descrição
SC_CC 1	Bioetanol
SC_CC 2	Amônia verde
SC_CC 3	Hidrogênio verde
SC_CC 4	Biometanol
SC_CC 5	Eletrometanol
SC_CC 6	LNG
SC_CC 7	Bio-LNG

As combinações possíveis para SP e SC foram baseadas nos resultados apresentados na seção 4.1. Para a seleção da solução de combustível, além do bio-LNG e bio-LPG, foram consideradas alternativas que incluem LNG e LPG, devido ao número significativo de navios na indústria que já utilizam esses combustíveis fósseis na transição. Além disso, os biocombustíveis do Grupo A, que são do tipo *drop-in*, foram inseridos como "biocombustíveis *drop-in*", devido às similaridades entre eles e a necessidade da mesma tecnologia de propulsão.

#### 4.2.5 Coleta das evidências (Passo V)

Para essa etapa, foi realizada uma reunião com os especialistas onde foram apresentadas em *power point* as tecnologias selecionadas de acordo com o passo IV e as principais informações técnicas retiradas da literatura relacionadas a cada uma delas. Posteriormente, foi realizado um debate para dúvidas e considerações referente às questões técnicas. A apresentação e a dissertação, finalizada até a Seção 4 e acompanhada das respectivas referências, foram enviadas por correio eletrônico a cada participante, permitindo que os especialistas as consultassem, caso necessário. Adicionalmente, documentos sobre o navio foram disponibilizados para consulta técnica na MB, caso fosse necessário obter informações além do conhecimento técnico existente sobre o navio do estudo e das informações contidas nesta dissertação.

#### 4.2.6 Análise dos dados e publicação (Passo VI)

Nesta etapa, foram aplicados os métodos de MCDM para peso dos critérios e seleção das melhores soluções de propulsão e de combustível, quando aplicável. A seguir, são apresentados os critérios para seleção da SP, para a seleção da SC e a aplicação do método de análise multicritério para seleção de solução de propulsão e combustível.



#### 4.2.6.1 Critérios para seleção da solução de propulsão (SP):

Os critérios para seleção das SP foram baseados em Wang et al. (2024). Os critérios identificados e aplicáveis ao estudo foram: custo do ciclo de vida, potencial de redução de emissões, ruído, segurança e espaço utilizado/peso. Foi adicionado o critério de maturidade tecnológica, devido a importância desse critério para aplicação atual, e o critério de aplicabilidade, que será baseado na opinião técnica da aplicação da SP no navio de guerra selecionado como objeto de estudo. A Tabela 14 apresenta os critérios para seleção da SP, com as respectivas descrições.

Tabela 14: Critérios para seleção da SP.

Critério	Descrição
Custo do Ciclo de vida	Despesas como custo de aquisição, instalação e manutenção.
Potencial de redução de emissões	A capacidade de uma determinada tecnologia ou sistema de propulsão reduzir a quantidade de poluentes liberados na atmosfera, com foco em emissões de CO <sub>2</sub> .
Ruído	Nível de ruído produzido por uma tecnologia ou sistema de propulsão. O ruído gerado por um sistema de propulsão pode ter impactos significativos em termos de conforto dos passageiros e tripulação, ou no caso de navio de guerra, na detecção do navio.
Segurança	Segurança do sistema para os tripulantes, passageiros, para o próprio navio e para o meio ambiente, exceto com relação às emissões de GEE.
Espaço Utilizado/peso	Quantidade de espaço físico ou peso necessário para acomodar o sistema e seus componentes dentro do navio.
Maturidade tecnológica	Nível de desenvolvimento e prontidão da tecnologia para uso no navio.
Aplicabilidade	O quanto é possível a aplicação da tecnologia, levando em consideração o navio de guerra selecionado para o estudo.

Fonte: Adaptado de Wang et al. (2024).

Os critérios para seleção da SP são mutuamente excludentes, permitindo a comparação par a par dos critérios. A comparação foi definida por dois especialistas que atuam na área gerencial da MB, os especialistas 1 e 2 da Tabela 10, e está disponível no APÊNDICE B: MATRIZES PAR A PAR PARA CRITÉRIOS DE PROPULSÃO E DE COMBUSTÍVEL. O valor dos pesos foi determinado pela agregação dos julgamentos dos especialistas utilizando o método AIJ com média geométrica. Foi aplicado o teste de consistência do método AHP, descrito no APÊNDICE A: MÉTODO AHP - TOPSIS, para verificação da consistência de opinião dos especialistas em relação aos critérios. Nesse teste, o valor obtido da taxa de consistência deve ser menor que 10% do RI para  $n=7$ , ou seja, menor que 0,135. O método, assim como os testes de consistência, foram gerados no *software* de programação *RStudio*, com códigos disponíveis no APÊNDICE C: CÓDIGOS *RSTUDIO* PARA PESO DOS CRITÉRIOS. O valor do teste de consistência foi de 0,129 e 0,091, para os especialistas 1 e 2, respectivamente. Como ambos são menores que 0,135, as opiniões foram consideradas consistentes. O valor dos pesos obtido pela média geométrica é apresentado na Tabela 15.

Tabela 15: Pesos dos critérios da propulsão.

Critério propulsão	Custo do ciclo de vida	Potencial de redução de emissões	Ruído	Segurança	Espaço Utilizado/ peso	Maturidade tecnológica	Aplicabilidade
Peso	0,11	0,07	0,05	0,28	0,11	0,26	0,12

#### 4.2.6.2 Critérios para a seleção da solução de combustível (SC)

Os critérios para seleção da SC foram baseados nos estudos de Andersson et al. (2020) e Hanson et al. (2019). Também foram adicionados critérios com base em informações relevantes obtidas nos resultados da revisão de literatura, como, por exemplo, "espaço de armazenagem" do combustível e flexibilidade. A Tabela 16 apresenta os critérios para seleção de combustível, com as respectivas descrições.

Tabela 16: Critérios para seleção da SC.

Critério	Descrição
Disponibilidade	Facilidade de aquisição e a disponibilidade do combustível no mercado.
Maturidade tecnológica	Nível de prontidão do combustível e tecnologias envolvidas para sua utilização.
Espaço de Armazenagem	Espaço necessário para armazenar o combustível a bordo do navio.
Custos gerais	Custo do combustível atrelado ao custo da tecnologia para utilizá-lo.
Segurança	Segurança relacionada à questões como: manuseio do combustível, inflamabilidade, toxicidade para tripulação e meio ambiente, exceto emissões de GEE.
Sustentabilidade emissões	geral e Como a produção e utilização do combustível impactam questões relacionadas à sustentabilidade, e emissões de CO <sub>2</sub> durante o ciclo de vida do combustível.
Flexibilidade	O quanto a aplicação desse combustível traz flexibilidade ao navio. Por exemplo, a escolha de utilização de alguns combustíveis permite a utilização de outros, trazendo mais flexibilidade.

Fonte: Adaptado de Andersson et al. (2020) e Hansson et al. (2019).

A comparação par a par dos critérios também foi definida pelos mesmos especialistas selecionados para os critérios de propulsão, e está disponível no APÊNDICE B: MATRIZES PAR A PAR PARA CRITÉRIOS DE PROPULSÃO E DE COMBUSTÍVEL. Os critérios para a seleção da SC encontram-se em dimensões distintas e independentes, não correlacionadas entre si. O valor dos pesos dos critérios para combustíveis também foi gerado pela agregação dos julgamentos dos especialistas utilizando o método AIJ com média geométrica. O método, assim como os testes de consistência, foram gerados no *software* de programação RStudio, com códigos disponíveis no APÊNDICE C: CÓDIGOS RSTUDIO PARA PESO DOS CRITÉRIOS. O teste de consistência obteve valores de 0,084 e 0,107, para a opinião do especialista 1 e 2, respectivamente. Como o valor foi abaixo de 10% do RI para n=7, ou seja, menor que 0,135, a opinião foi considerada consistente. O valor dos pesos obtido pela média geométrica é apresentado na Tabela 17.

Tabela 17: Pesos dos critérios de combustível.

Critério combustível	Disponibilidade	Maturidade tecnológica	Espaço de armazenagem/densidade	Custos gerais	Segurança	Sustentabilidade geral e emissões	Flexibilidade
Peso	0,12	0,16	0,21	0,18	0,15	0,15	0,03

#### 4.2.6.3 Aplicação do método de análise multicritério para seleção de solução de propulsão e combustível

As soluções de propulsão apresentadas na subseção 4.2.4, Tabela 11, foram avaliadas pelos especialistas 1, 2, 3, 4, com relação a cada critério estabelecido para propulsão. Os 4 especialistas atribuíram notas de 1 a 5, referente a escala *Likert* de 5 pontos, para cada solução em cada critério. As matrizes com os resultados constam no APÊNDICE D: MATRIZES DE JULGAMENTO DE SP EM CADA CRITÉRIO E CÓDIGO RSTUDIO PARA MÉTODO TOPSIS PARA SP. Foi realizada uma média aritmética das quatro matrizes, pois ela representa o "centro de gravidade" da distribuição dos julgamentos (Feijoo, 2010), apresentada na Tabela 18, e o método TOPSIS foi aplicado, utilizando o peso dos critérios de propulsão da Tabela 15. O código utilizado no *software RStudio* está disponível no APÊNDICE D: MATRIZES DE JULGAMENTO DE SP EM CADA CRITÉRIO E CÓDIGO RSTUDIO PARA MÉTODO TOPSIS PARA SP. A solução que obteve a primeira posição no *ranking* foi a SP1, ou seja, a utilização de ICE na configuração mecânica.

Tabela 18: Média aritmética das matrizes de julgamento SP.

SP	Custo do Ciclo de Vida	Potencial de redução de emissões	Ruído	Segurança	Espaço Utilizado/peso	Maturidade tecnológica	Aplicabilidade
1	4,25	2	1,75	3,75	4,25	4,75	5
2	2,5	4,5	4,75	3,25	2,5	4,25	3,25
3	2	4,75	4,75	2,5	2,75	2,25	3
4	2,5	4,75	4,25	3,75	1	3	1,25
5	2,75	4,75	4,5	4	1	2,75	1,5
6	2	4,75	4,5	4	1	2,75	1,5
7	1,5	5	4,75	2,75	1,5	1,75	2
8	1	4,75	4	2	2,5	3,5	2,5
9	3	3,25	3,5	4	2,25	4	4,75
10	2	4	3	2,75	2,5	2,25	2
11	3,5	3,75	3,25	4	1,5	3	1,5
12	3	3,5	3	3,5	1,25	3,25	1,5
13	2	3,75	3,25	3	1,5	1,75	1,5

O resultado do *ranking* de soluções tecnológicas a serem aplicadas é apresentado na Tabela 19.

Tabela 19: *Ranking* SP no método TOPSIS.

<i>Ranking</i>	SP	Descrição	Pontuação TOPSIS
1	1	ICE	0,8532094
2	9	ICE + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor	0,6984077
3	2	Bateria (BESS) com ou sem supercapacitor	0,6322585
4	11	ICE + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor + energia solar	0,4668034
5	12	ICE + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor + energia eólica	0,4297133
6	5	Energia solar + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	0,420029
7	4	Energia eólica + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	0,406945

Ranking	SP	Descrição	Pontuação TOPSIS
8	6	Energia eólica + energia solar + bateria(BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	0,4006103
9	8	Energia nuclear	0,3940133
10	3	Células a combustível + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	0,346692
11	10	ICE + célula a combustível + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor	0,295282
12	13	ICE + célula a combustível + bateria(BESS) com ou sem supercapacitor + energia eólica e/ou solar	0,2275964
13	7	Células a combustível + Energia eólica e/ou solar + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	0,2218649

Como a SP1 envolve a utilização de combustível em ICE, os especialistas avaliaram as SC\_ICE nos critérios definidos para combustíveis. Novamente atribuíram notas de 1 a 5, referente a escala Likert de 5 pontos, para cada solução em cada critério. As matrizes com os resultados constam no APÊNDICE E: MATRIZES DE JULGAMENTO DE SC\_ICE EM CADA CRITÉRIO E CÓDIGO RSTUDIO PARA MÉTODO TOPSIS PARA SC\_ICE. Foi realizada uma média aritmética das quatro matrizes, apresentada na Tabela 20. O método TOPSIS foi aplicado a essa matriz, utilizando o peso dos critérios definidos anteriormente, observados na Tabela 17. O código utilizado no *software RStudio* está disponível no APÊNDICE E: MATRIZES DE JULGAMENTO DE SC\_ICE EM CADA CRITÉRIO E CÓDIGO RSTUDIO PARA MÉTODO TOPSIS PARA SC\_ICE.

Tabela 20: Média aritmética das matrizes de julgamento SC\_ICE.

SC ICE	Disponibilidade	Maturidade tecnológica	Espaço de Armazenagem/densidade	Custos gerais	Segurança	Sustentabilidade geral e emissões	Flexibilidade
1	3,5	4,25	4,5	3,25	4,25	3	3,25
2	3,5	2,75	3,75	3	4	3,5	3
3	4	4,25	2,75	3,75	2,75	1,75	4,25
4	2,25	3,5	2,75	2,75	3	3,75	4
5	4	3,75	3,5	3,75	3,5	2	4,25
6	2,25	3	3,5	3	3,75	3,75	4
7	2	2,75	1,75	2,5	2	4,75	3,25
8	2	2	1	1,5	1,75	5	3
9	3,5	4,25	3,5	4	3	3,75	4,25
10	1,5	2,25	3,5	2	3	4,25	4
11	1,5	2,25	3,5	2,25	2,75	4,25	4
12	1,75	3	4,25	2	4,25	4,75	3,25

O ranking obtido pelo método para SC\_ICE pode é demonstrado na Tabela 21.

Tabela 21: Ranking SC\_ICE no método TOPSIS.

Ranking	SC_ICE	Descrição	Pontuação TOPSIS
1	1	Biocombustível <i>drop-in</i>	0,7674381
2	9	Biometanol	0,7347727
3	2	Bioetanol	0,6673656
4	5	LPG	0,6525544
5	6	Bio-LPG	0,6157322
6	12	Eletrodiesel	0,6138461
7	3	LNG	0,5674264
8	4	Bio-LNG	0,5125914
9	11	Eletrometano	0,4894504
10	10	Eletrometanol	0,4833236
11	7	Amônia verde	0,3713977
12	8	Hidrogênio verde	0,2839704

Como resultado do método, a solução de combustível que obteve a primeira posição no *ranking* é a SC\_ICE 1, ou seja, biocombustível do tipo *drop-in*. Portanto, a solução tecnológica final, baseada na opinião dos especialistas, é a aplicação de ICE na configuração mecânica, com utilização de biocombustível do tipo *drop-in*.

#### **4.2.7 Devolução aos respondentes/organização para validação ou não das evidências coletadas (Item VII)**

Os resultados gerados foram apresentados aos especialistas, que validaram a solução como a melhor a ser aplicada no navio de guerra selecionado para o estudo.

### **4.3 Discussões**

A escolha da melhor solução tecnológica para reduzir as emissões de carbono em um navio de guerra requer uma avaliação baseada em diversos critérios. Dois especialistas contribuíram com suas opiniões sobre a importância relativa desses critérios, resultando em perspectivas complementares e, por vezes, divergentes.

Por um lado, com relação aos critérios para a escolha da solução de propulsão, o primeiro especialista priorizou a segurança acima de todos os outros critérios, destacando que a proteção da tripulação é essencial. A necessidade de maior segurança é amplificada por se tratar de um navio de guerra. O custo do ciclo de vida é o segundo critério mais importante, devido aos recursos limitados da Marinha do Brasil. Em terceiro lugar, está a maturidade tecnológica, pois tecnologias mais maduras oferecem maior confiabilidade e disponibilidade, reduzindo riscos operacionais. Entre os critérios intermediários, o ruído é relevante para manter a discricção do navio durante operações, evitando sua detecção. O potencial de redução de emissões de carbono é crucial para que a Marinha esteja em conformidade com as exigências de descarbonização do setor naval. O espaço utilizado/peso também é significativo, considerando a limitação de espaço em um navio de guerra. Por último, a aplicabilidade é vista como o critério menos importante, pois é considerada uma questão técnica que pode ser resolvida em fases posteriores do projeto.

Por outro lado, o segundo especialista colocou a aplicabilidade como o critério mais importante, acreditando que a viabilidade da tecnologia para um navio de guerra é essencial. Seguiu-se a maturidade tecnológica, enfatizando que a tecnologia precisa ter maturidade suficiente para garantir uma implementação bem-sucedida e segura. O espaço utilizado/peso da tecnologia é considerado o terceiro critério mais importante, devido à limitação de espaço extra em navios de guerra. Este especialista classifica a segurança, o potencial de redução de emissões e o custo do ciclo de vida como critérios intermediários. A segurança continua sendo vital, mas outros critérios foram priorizados. O custo é relevante, mas menos prioritário em comparação com os critérios anteriores, pois acredita que questões orçamentárias podem ser resolvidas com o apoio de instituições superiores. Por último, o ruído é considerado o critério menos importante. Apesar de ser um fator relevante para não detecção de um navio de guerra, ele é considerado menos crítico, pois atualmente os navios já utilizam configurações mecânicas, que emitem mais ruído do que as formas elétricas e híbridas.

A análise revelou uma diferença significativa nas abordagens dos dois especialistas. Enquanto o primeiro colocou uma ênfase maior na segurança e no custo, refletindo preocupações operacionais e orçamentárias imediatas, o segundo focou na aplicabilidade prática e na maturidade tecnológica, considerando a viabilidade e a confiabilidade das soluções.

A opinião conjunta dos especialistas, baseada nas opiniões individuais e gerada pela aplicação do método AHP, demonstrou que os critérios considerados mais importantes para a seleção da escolha da solução de propulsão são segurança e maturidade tecnológica. Aplicabilidade, custo do ciclo de vida e espaço utilizado/peso são os critérios considerados intermediários em prioridade, e potencial de redução de emissões e ruído os menos importantes. Os critérios e os respectivos pesos foram apresentados na Tabela 15, na Subseção 4.2.6.1.

Na escolha de preferência dos critérios para combustível, os especialistas também apresentaram convergências e divergências de opiniões, o que reflete a complexidade e os desafios inerentes à seleção de tecnologias sustentáveis para um navio de guerra. O primeiro especialista enfatiza a segurança como o critério mais importante, devido aos riscos associados ao manuseio de combustíveis, como inflamabilidade e toxicidade, que podem impactar tanto a tripulação quanto o meio ambiente. Em seguida, ele destaca a maturidade tecnológica, argumentando que um maior nível de prontidão tecnológica oferece mais confiabilidade e disponibilidade para as operações do navio. Por outro lado, o segundo especialista coloca a sustentabilidade e as emissões como o critério mais importante, afirmando que é mais eficiente reduzir as emissões através da escolha do combustível do que pela tecnologia de propulsão empregada. Ele também atribui alta importância aos custos gerais, dado o volume significativo de combustível que será utilizado ao longo do tempo, o que pode resultar em despesas elevadas. Ambos os especialistas destacam a preocupação com o espaço de armazenamento/densidade do combustível na terceira posição, devido à limitação de espaço disponível em um navio de guerra para armazenamento de combustível. Na quarta posição de ambos os especialistas está o critério de disponibilidade, pois assegura que o combustível pode ser mais facilmente adquirido. No entanto, para o primeiro especialista, os critérios de custo geral e sustentabilidade geral e emissões não são tão prioritários em comparação aos outros. Ele acredita que os custos do combustível não impactam tanto quanto o custo de aquisição e instalação de um sistema de propulsão, por exemplo. Embora considere a sustentabilidade e as emissões importantes, ele não vê como um critério essencial, pois os navios de guerra não são atualmente obrigados a cumprir metas de redução de emissões. Por outro lado, o segundo especialista atribui menor relevância à maturidade tecnológica e à segurança do combustível em comparação aos outros critérios. Ambos os especialistas consideram a flexibilidade o critério menos importante, argumentando que a capacidade de escolher entre vários combustíveis não é essencial. Durante períodos de guerra ou emergência nacional, o governo pode adotar medidas para assegurar o suprimento de recursos essenciais, incluindo combustíveis.

As diferenças observadas podem ser atribuídas às distintas perspectivas sobre os desafios operacionais e estratégicos enfrentados pelos navios de guerra. Enquanto o primeiro especialista prioriza a segurança e a prontidão operacional imediata, o segundo especialista foca em uma visão de longo prazo, considerando os impactos ambientais e custos como principais fatores.

Ao compilar a opinião conjunta dos especialistas pelo método AHP, considerando as opiniões individuais, o critério considerado mais importante foi espaço de armazenagem/densidade, seguido de custos gerais. Em seguida, aparecem maturidade tecnológica, segurança, sustentabilidade geral e emissões, e disponibilidade, nessa ordem. O critério de flexibilidade foi classificado como o menos importante, com o menor peso. Os critérios e seus respectivos pesos foram apresentados na Tabela 17 na Subseção 4.2.6.2. De forma geral, observa-se uma proximidade nos pesos atribuídos aos critérios de combustível, exceto para flexibilidade, que obteve um peso significativamente menor.

Como resultado da aplicação do método TOPSIS, a SP1, que consiste na utilização de ICE na configuração mecânica, foi identificada como a solução ideal

para o navio de guerra NPa500MB. Esta opção obteve alta pontuação nos critérios de custo, segurança, espaço, maturidade tecnológica e aplicabilidade, considerados os mais importantes pelo método AHP. Em contrapartida, a SP1 apresentou uma pontuação menor nos critérios de menor peso, especificamente em redução de emissões e ruído. Por essa razão, foi classificada como a solução ideal. Os especialistas consideraram que essa solução possui alta maturidade, pois é amplamente utilizada pela maioria dos navios operacionais, inclusive navios de guerra. Além disso, os custos de manutenção e instalação são reduzidos em comparação com outras opções, e a solução demanda um baixo envelope dimensional, ou seja, requer menos espaço para instalação no navio e exige menos modificações no projeto. No entanto, a pontuação no critério de potencial de redução de emissões é mais baixa, uma vez que varia conforme o combustível utilizado e suas formas de produção. Existem outras SPs que garantem uma redução maior ou até próximas a zero. No critério de ruído, a pontuação também é baixa, pois as tecnologias atuais normalmente emitem mais ruído do que configurações elétricas ou híbridas.

Na segunda posição do *ranking* de SP temos a SP9, com uma configuração híbrida que utiliza ICE e baterias. Essa é uma opção a ser considerada, pois a utilização de baterias permite aos navios obter maior eficiência energética, alternando entre o ICE e a bateria conforme necessário, aumentando a flexibilidade operacional. Os especialistas consideram que essa solução possui uma elevada maturidade tecnológica e boa aplicabilidade, já sendo empregada em diversos navios com facilidade de adaptação aos projetos existentes e disponibilidade de mão-de-obra capacitada para manutenção. Embora as baterias de íon-lítio ainda estejam em fase de desenvolvimento e melhorias, elas já alcançaram um nível significativo de maturidade tecnológica para aplicação naval. Em termos de segurança, essa solução recebe uma pontuação intermediária. Um dos especialistas destacou a necessidade de monitoramento e controle dos níveis de gases emitidos, dependendo do tipo de bateria utilizada. Os custos do ciclo de vida dessa solução são um pouco mais elevados do que os da SP1, devido ao preço mais alto das baterias. Além disso, as baterias demandam mais espaço para armazenamento, ocupando um envelope dimensional maior. No entanto, a SP9 apresenta um potencial maior de redução de emissões em comparação à SP1, além de gerar menos ruído, o que é uma vantagem significativa para operações discretas e ambientalmente responsáveis. A configuração dessa solução como diesel elétrica, onde o ICE fornece energia tanto para o motor elétrico quanto para a bateria, é considerada uma boa opção pelos especialistas.

Na terceira posição do *ranking*, temos a utilização de uma configuração totalmente elétrica com aplicação de baterias, a SP2. As baterias já demonstram maturidade para aplicação prática, com navios totalmente elétricos operando atualmente. No entanto, é crucial que haja um maior desenvolvimento das baterias de íon-lítio, especialmente em termos de armazenamento de energia, para otimizar essa configuração. Os principais desafios associados ao uso exclusivo de baterias em um navio de guerra incluem os altos custos, especialmente os de aquisição, e a demanda por espaço de armazenamento, que é significativamente maior se comparado à configuração mecânica com ICE. Apesar desses desafios, essa configuração oferece vantagens como níveis de ruído reduzidos em comparação com configurações tradicionais e uma considerável diminuição de GEE. A logística de recarga das baterias em terra também é um aspecto crucial a ser considerado. Em termos de segurança, é essencial monitorar e controlar os níveis de gases emitidos por certos tipos de baterias, garantindo operações seguras e eficientes.

As soluções que incorporam energia solar ou eólica em configurações híbridas ou totalmente elétricas ficaram em uma posição intermediária no *ranking*. A combinação de ICE com energia eólica ou solar proporciona maior autonomia

ao sistema, reduzindo a dependência exclusiva de fontes de energia renovável. No entanto, os especialistas observaram que a aplicação de energia eólica requer uma área considerável para a instalação das turbinas, o que torna inviável para navios de guerra de pequeno porte devido aos equipamentos militares no convés. Além disso, a manutenção dessa tecnologia exige mão-de-obra especializada, ainda restrita atualmente. O mesmo desafio se aplica à utilização de painéis solares. Os especialistas indicam que a instalação de painéis solares no convés é viável em navios maiores, que possuem mais espaço disponível. Eles também recomendam que a energia gerada por essas fontes renováveis seja utilizada pontualmente para sistemas específicos, como sistemas de comunicação interna, radares, dentre outros. Em configurações totalmente elétricas, essas soluções receberam boas pontuações nos critérios de potencial de redução de emissões, níveis de ruído e segurança. Entre a energia solar e eólica, a tecnologia solar foi considerada mais adequada tanto para configurações híbridas com ICE quanto para configurações elétricas puras.

A energia nuclear foi classificada como a nona posição no *ranking* TOPSIS. Esta tecnologia apresenta uma maturidade tecnológica mediana, já sendo aplicada em submarinos e alguns navios de guerra, mas ainda requer desenvolvimento para uma aplicação mais ampla. Os critérios de potencial de redução de emissões e ruído receberam as pontuações mais altas, uma vez que a energia nuclear permite praticamente eliminar as emissões de GEE e produz pouco ruído. No entanto, os custos associados à aquisição, instalação, operação e manutenção são elevados, e há preocupações com a segurança devido à possibilidade de radiação dos combustíveis nucleares, como o urânio. O critério de espaço recebeu uma pontuação baixa, pois, apesar de estudos mostrarem que os reatores nucleares podem ocupar o espaço destinado à propulsão convencional, outros sistemas necessários para a utilização, demandam um espaço adicional significativo. No entanto, um dos especialistas argumenta que, devido à autonomia que a energia nuclear pode proporcionar, há a possibilidade de utilizar reatores de menor tamanho, reduzindo a demanda por espaço. Os especialistas consideram que os custos atuais tornam a energia nuclear viável apenas para navios de grande porte. No entanto, se os custos dessa tecnologia diminuírem e novos avanços tornarem os reatores mais seguros, a energia nuclear poderá ser uma opção considerável para o futuro.

As soluções que envolvem a utilização de células a combustível ocuparam as últimas posições no *ranking*. Os especialistas consideraram que as células a combustível ainda não têm maturidade suficiente e possuem baixa disponibilidade. Em termos de espaço e aplicabilidade em um navio de guerra, receberam pontuação intermediária, pois ocupam menos espaço que as baterias e já são aplicadas em alguns navios. No entanto, apresentam custos elevados e desafios de segurança, principalmente relacionados a vazamentos do combustível empregado, já que a utilização mais madura é a PEMFC movida a hidrogênio, considerado inflamável. Apesar dessas desvantagens, as células a combustível têm um alto potencial de redução de emissões de carbono, principalmente as movidas a hidrogênio, que não produzem poluentes como subprodutos, e também apresentam baixos níveis de ruído. As soluções que combinam células a combustível com ICE ficaram em uma posição mais baixa no *ranking* em comparação com a combinação de células a combustível com BESS, principalmente devido ao critério de aplicabilidade. Os especialistas avaliaram que a utilização simultânea de ICE e células a combustível em um navio apresenta baixa aplicabilidade devido à necessidade de combustível para ambos os sistemas, o que dificulta a conciliação de um único tipo de combustível. As células a combustível mais maduras são movidas a hidrogênio, enquanto os motores ICE movidos a hidrogênio ainda são muito recentes e geralmente aplicados apenas a navios menores. Implementar essa combinação exigiria dois tanques de



armazenamento de combustível, ocupando um espaço significativo, agravado pela baixa densidade volumétrica do hidrogênio, que demanda ainda mais espaço de armazenamento.

Adicionar a aplicação de energia eólica ou solar torna essa solução ainda menos viável devido à necessidade adicional de espaço e aos custos elevados. Em último lugar no *ranking* TOPSIS, está a SP7, que, apesar de apresentar boa pontuação em potencial de redução de emissões e ruído, características comuns às configurações totalmente elétricas, possui altos custos de aquisição e manutenção. Além disso, necessita de grande espaço devido à ausência de ICE para gerar energia adicional, exigindo mais módulos de células a combustível e baterias. Portanto, sua aplicabilidade foi considerada baixa pelos especialistas.

Quanto às SC\_ICE, os especialistas opinaram sobre cada uma delas nos critérios de combustível. A SC\_ICE vencedora foi a utilização de biocombustíveis do tipo *drop-in*. Essa solução obteve bom desempenho nos critérios de maturidade tecnológica, espaço e segurança. Os especialistas consideraram que a produção de biocombustíveis do tipo *drop-in*, especialmente no Brasil, já está consolidada e os processos de produção são bem conhecidos. Os biocombustíveis *drop-in* são considerados seguros e ocupam menos espaço comparado a outras opções devido à similaridade com o combustível convencional. Nos critérios de disponibilidade, custos e sustentabilidade, os especialistas atribuíram pontuação intermediária. Os biocombustíveis *drop-in* têm custos ligeiramente mais altos que os combustíveis convencionais e enfrentam desafios de sustentabilidade, particularmente relacionados ao uso da terra e aos métodos de produção. Esses desafios, como a competição com cultivos alimentares e a disponibilidade de áreas para produção, impactam sua disponibilidade. Como os critérios com os maiores pesos para combustíveis são espaço, custo e maturidade, esse combustível alternativo foi considerado ideal para um navio de guerra, especialmente pelo critério de espaço. Além disso, alguns biocombustíveis *drop-in*, como o biodiesel, já estão sendo testados em diferentes percentuais de mistura. Os especialistas acreditam que o biocombustível pode ser inicialmente aplicado em percentuais mais baixos, com a possibilidade de aumentar gradativamente conforme os testes avancem e misturas mais altas se tornem viáveis.

Na segunda posição no *ranking* de combustíveis, temos o biometanol. Os especialistas consideraram que, apesar de sua produção necessitar um maior desenvolvimento, esse combustível possui boa maturidade tecnológica, com motores já desenvolvidos. Além disso, o número de aplicações em navios vem crescendo nos últimos anos, com mais de 100 encomendas pela indústria marítima. Também destacaram que os custos do biometanol são mais baixos quando comparados a outros combustíveis alternativos, como hidrogênio, amônia e eletrocombustíveis. O biometanol também oferece boa flexibilidade, uma vez que seus motores permitem a utilização de metanol cinza e verde, combustível convencional e biocombustíveis do tipo *drop-in*. Nos critérios de disponibilidade, espaço de armazenamento e segurança, o biometanol recebeu pontuação intermediária. Os especialistas observaram que o biometanol é importado no Brasil, até mesmo o metanol utilizado na produção de biodiesel. Quanto ao espaço, o biometanol possui uma densidade mais baixa, necessitando de aproximadamente o dobro de espaço de armazenamento em comparação ao combustível convencional. No entanto, essa necessidade de espaço é ainda menor que a do hidrogênio e da amônia. Em relação à segurança, o metanol é altamente inflamável, representando um desafio significativo para sua aplicação em um navio de guerra. Apesar disso, é biodegradável e possui normas estabelecidas para seu manuseio seguro.

Na terceira posição do *ranking* temos bioetanol. Três especialistas consideraram que esse combustível possui uma boa disponibilidade, destacando

o Brasil como um dos maiores produtores. No entanto, atualmente não existem motores marítimos desenvolvidos especificamente para sua utilização. Testes estão sendo conduzidos por uma empresa de motores marítimos, e caso seja desenvolvido um motor movido a bioetanol no futuro, essa poderá ser uma opção viável para navios de guerra brasileiros. Em termos de segurança, foi considerado superior ao biometanol pelos especialistas. Com relação ao espaço, sustentabilidade e flexibilidade, o bioetanol recebeu pontuação intermediária. Sua densidade é menor que a dos combustíveis convencionais, o que implica maior área necessária para armazenamento. Questões de sustentabilidade comuns aos biocombustíveis também foram levantadas. Quanto à flexibilidade, sua pontuação foi considerada mediana. Embora o motor ainda não esteja disponível, estudos sugerem que ele será o mesmo utilizado para o metanol. Dessa forma, os especialistas acreditam que o motor destinado ao uso de etanol poderá também ser compatível com metanol, biometanol e eletrometanol, além de combustíveis convencionais e biocombustíveis do tipo *drop-in*.

No *ranking* de combustíveis, tanto o LPG e o LNG, e suas formas verdes, quanto os eletrocombustíveis foram classificados em uma posição intermediária. O LPG e LNG são utilizados como combustíveis de transição, mas no Brasil têm disponibilidade limitada em comparação ao etanol e aos biocombustíveis do tipo *drop-in*, como o biodiesel. Globalmente, no entanto, esses combustíveis possuem boa disponibilidade, o que contribuiu para sua pontuação média nesse critério. Ambos receberam alta pontuação nos critérios de maturidade tecnológica, flexibilidade e custo. São amplamente utilizados por navios para reduzir emissões de CO<sub>2</sub>, especialmente para cumprir os regulamentos da IMO, o que demonstra sua maturidade tecnológica. Os motores *dual fuel* oferecem flexibilidade ao permitir o uso de combustíveis convencionais, biocombustíveis do tipo *drop-in*, bem como formas cinza e bio desses combustíveis. Em termos de custo, são mais acessíveis em comparação ao hidrogênio, amônia e eletrocombustíveis. No entanto, esses combustíveis requerem quase o dobro de espaço de armazenamento e apresentam baixa segurança devido à inflamabilidade. Em relação à sustentabilidade e emissões, receberam baixa pontuação, uma vez que são derivados de fontes fósseis e geram emissões de CO<sub>2</sub>. As formas verdes, como Bio-LPG e Bio-LNG, têm maturidade tecnológica mais baixa, disponibilidade limitada em comparação com as formas cinzas e custos mais altos. No entanto, são consideradas superiores em termos de sustentabilidade e emissões, pois oferecem uma alternativa mais ambientalmente amigável em comparação com seus equivalentes convencionais.

O eletrodiesel ficou entre o LPG e o LNG, e suas formas verdes, ocupando a sexta posição do *ranking*. Segundo os especialistas, o eletrocombustível recebeu boa pontuação em espaço, armazenamento e segurança, por ter a mesma composição que o diesel. Também se destacou em sustentabilidade e emissões, pois sua produção, a partir de hidrogênio verde, CCS ou DAC, possibilitam uma produção livre de emissões de carbono, caso o hidrogênio seja produzido a partir da eletrólise da água com energia renovável. No entanto, os eletrocombustíveis possuem um alto custo e baixa disponibilidade, o que contribuiu para uma posição intermediária para esse combustível.

Praticamente empatados no *ranking* estão o eletrometano e o eletrometanol. Eles obtiveram uma pontuação similar ao eletrodiesel, pois são produzidos a partir das mesmas fontes, além de também possuírem altos custos e baixa disponibilidade. No entanto, foram considerados menos seguros que o eletrodiesel devido à sua inflamabilidade, e exigem aproximadamente o dobro de espaço de armazenamento, semelhante ao necessário para o LNG e o metanol. Esses aspectos são especialmente críticos para um navio de guerra.

A amônia verde ocupou a penúltima posição no *ranking*, sendo classificada acima apenas do hidrogênio verde. Ambos requerem um espaço significativo para

armazenamento e apresentam desafios de segurança. Os especialistas destacam que o hidrogênio, em particular, apresenta altos riscos relacionados à segurança, devido à inflamabilidade, e demanda uma quantidade considerável de espaço para os tanques de combustível, especialmente porque a produção a partir de água do mar ainda está em fase de pesquisa. A amônia verde obteve um desempenho ligeiramente melhor, devido à sua maior maturidade tecnológica, com motores *dual fuel* desenvolvidos. Além disso, há uma tendência crescente para a utilização da amônia em navios, com alguns deles sendo projetados prontificados para sua utilização futura. Por outro lado, os motores *dual fuel* a hidrogênio são uma tecnologia recente e até o momento foram aplicados apenas em rebocadores. Ambos os combustíveis enfrentam desafios significativos de disponibilidade e têm custos elevados, mas são considerados sustentáveis, pois suas moléculas não contêm carbono, resultando em pouca ou nenhuma emissão de poluentes.

A Tabela 22 apresenta um quadro resumo para a solução tecnológica ideal para o navio do estudo de caso, NP<sub>a</sub> 500MB, em termos de método de propulsão, módulo de geração de energia, módulo de armazenamento de energia e combustível, demonstrando suas vantagens e desvantagens.

Tabela 22: Quadro resumo da solução tecnológica ideal.

Tecnologia	Tipo	Vantagens	Desvantagens
Método de propulsão	Mecânica	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Alta maturidade tecnológica</li> <li>. Design menos complexo</li> <li>. Mais fácil de ser operada</li> <li>. Custos mais baixos</li> <li>. Segura</li> <li>. Já é aplicada à navios de guerra</li> <li>. Baixa necessidade de treinamento da tripulação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Maior nível de ruído</li> <li>. Baixa manobrabilidade</li> <li>. Baixa flexibilidade</li> </ul>
Módulo de geração de energia	ICE	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Alta maturidade tecnológica</li> <li>. Módulo mais utilizado em navios</li> <li>. Não demanda grandes alterações de projeto</li> <li>. Boa confiabilidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Maior nível de ruído</li> <li>. A redução das emissões de GEE depende do tipo de combustível utilizado</li> </ul>
Módulo de armazenamento de energia	-	-	-
Combustível	Biocombustível do tipo <i>drop-in</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Compatível com motores atuais</li> <li>. Densidade próxima ao combustível convencional, exigindo menos espaço</li> <li>. Seguros</li> <li>. Maior disponibilidade no Brasil</li> <li>. Boa maturidade tecnológica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Custos mais altos que o combustível convencional</li> <li>. Potencial de redução depende da matéria-prima e produção</li> <li>. Questões relacionadas a disponibilidade de terra, ao uso do solo e competição com a produção de alimentos</li> <li>. Atualmente são utilizados com um percentual misturado ao combustível convencional.</li> </ul>

## 5 Conclusões e Pesquisas Futuras

Este estudo investigou as potenciais soluções tecnológicas para descarbonização marítima aplicáveis ao navio de guerra NPa 500MB da MB. Para isso, a revisão da literatura e o estudo de caso único constituíram a base multimetodológica da pesquisa. A revisão da literatura permitiu a identificação das soluções tecnológicas de descarbonização marítima disponíveis, destacando suas vantagens e desvantagens. Com base nessa revisão, foram identificadas treze soluções tecnológicas, organizadas em três configurações distintas: mecânica, elétrica e híbrida, que foram avaliadas levando em consideração a aplicação em um navio de guerra. A aplicação do método MCDM no estudo de caso revelou que a configuração mecânica, utilizando ICE e biocombustíveis do tipo *drop-in*, foi identificada como a solução ideal para o navio de guerra selecionado. Essa configuração foi destacada por requerer menos espaço de armazenamento, apresentar maior segurança, custos de implementação reduzidos, maturidade tecnológica e alta aplicabilidade em navios de guerra. Adicionalmente, o Brasil se destaca como um dos maiores produtores de biodiesel.

A configuração híbrida com ICE e bateria demonstrou bom desempenho, emergindo como uma opção promissora para consideração. A incorporação de baterias oferece maior flexibilidade ao sistema. As baterias desempenham a função de *peak shaving*, armazenando eletricidade em quando há baixa demanda de energia, e a liberando quando a demanda é alta. Outra alternativa competitiva é a configuração totalmente elétrica com BESS. No entanto, apesar da maturidade da aplicação de baterias em navios, o ideal é que as baterias de íon-lítio alcancem um desenvolvimento maior para aumentar sua viabilidade. Melhorias significativas no armazenamento de energia permitiriam reduzir a necessidade de módulos de bateria, conseqüentemente exigindo menos espaço e proporcionando maior autonomia ao navio.

O biometanol ocupa a segunda posição entre as opções de combustível destacadas no estudo, seguido pelo bioetanol em terceiro lugar. Os motores *dual fuel* a metanol trazem flexibilidade, permitindo também a utilização de biometanol, metanol verde, combustíveis convencionais e biocombustíveis do tipo *drop-in*, e já estão disponíveis e possuem maturidade tecnológica. Essa flexibilidade é vantajosa, pois viabiliza o uso de uma variedade maior de combustíveis, possibilitando que no futuro, quando o eletrometanol estiver mais amplamente disponível, possam ser utilizados sem a necessidade de alterações no projeto ou *retrofit*. No entanto, a utilização de metanol como combustível requer aproximadamente o dobro do espaço de armazenamento e apresenta riscos significativos de inflamabilidade, questões críticas para um navio de guerra de pequeno porte com limitações de espaço. O bioetanol, classificado em terceiro lugar, representa uma promissora opção futura, especialmente considerando que o Brasil é o segundo maior produtor desse biocombustível. No entanto, ainda não existem motores disponíveis que operem especificamente com bioetanol. Antes de a MB implementar a solução ideal ou qualquer outra alternativa, é crucial avaliar a infraestrutura de abastecimento existente e estabelecer parcerias necessárias. Isso é especialmente importante dado que não foram identificados portos no Brasil com essa infraestrutura operacional.

Atualmente, o LNG e o LPG têm sido amplamente adotados como combustíveis de transição. Observa-se também um aumento significativo no número de navios movidos a metanol, além dos primeiros projetos de embarcações movidas a amônia. Estudos indicam que os combustíveis do futuro serão o hidrogênio verde e seus derivados, como a amônia verde e os eletrocombustíveis. O Brasil possui um enorme potencial para se tornar um grande produtor e exportador de hidrogênio verde e seus derivados, impulsionado pela

sua capacidade de geração de energia eólica e solar. Porém, o hidrogênio verde e a amônia verde enfrentam desafios significativos, especialmente relacionados à necessidade de grandes espaços de armazenamento e às preocupações com a inflamabilidade ou a toxicidade.

A utilização de células a combustível é vista como uma tendência de longo prazo, à medida que se tornam mais tecnologicamente maduras e os custos diminuem. O uso de energia eólica e solar tem crescido nos últimos anos e pode contribuir significativamente para a redução das emissões de carbono no setor marítimo, apesar de demandarem um grande espaço disponível para instalação.

A energia nuclear tem sido aplicada em marinhas de alguns países, especialmente em submarinos e quebra-gelos. Embora seja uma tecnologia relativamente madura, enfrenta desafios significativos relacionados à segurança e à aceitação social. Além disso, seus altos custos são justificáveis apenas para navios de grande porte.

O futuro da descarbonização marítima provavelmente implicará na adoção de várias soluções complementares. A redução de velocidade em "tempos de paz" pode ajudar a diminuir o consumo de combustível de um navio de guerra e, conseqüentemente, as emissões de GEE. Melhorias na hidrodinâmica, como otimização do casco e aplicação de tecnologias de revestimento e sistemas de lubrificação por ar são estratégias que podem ser implementadas, assim como de de-rating para melhorar a eficiência do motor e sistemas de recuperação de calor residual. A aplicação de modelos de otimização, especialmente para rotas, simulação e análise de *big data*, são tendências que podem contribuir significativamente para a descarbonização. Como pós-tratamento, a utilização de CCS pode ser aplicada, à medida que alcança maturidade tecnológica.

Incentivos governamentais nessa fase inicial, com subsídios, incentivos financeiros e políticas para o desenvolvimento de tecnologias de descarbonização são considerados essenciais, assim como a construção de infraestrutura de abastecimento para utilização dessas tecnologias.

As proposições iniciais do estudo forneceram a base para generalizações, e foram corroboradas. Os resultados do estudo indicam que a MB pode implementar tecnologias de descarbonização em um Navio de Guerra. Esses achados também podem ser aplicáveis a outros Navios de Guerra de tamanho e tipos de viagem semelhantes, uma vez que as questões abordadas, como por exemplo espaço disponível e segurança, são comuns a esses navios devido à sua similaridade. A terceira proposição também é corroborada. A MB optou pela aplicação da ambidestria organizacional do tipo estrutural, onde a DGDNTM é a organização responsável pelas atividades relacionadas à CT&I. Um dos programas sob sua supervisão, o PMN, está desenvolvendo um protótipo em terra para uma planta naval de propulsão nuclear, com o objetivo de finalizar a instalação no primeiro Submarino de Propulsão Nuclear. Dessa forma alcançará a capacidade de projetar, construir, operar e manter submarinos movidos a energia nuclear. Isso demonstra que a MB tem a capacidade de explorar inovações ao mesmo tempo que incrementa suas atividades atuais.

Ao apresentar o estado da arte das tecnologias e combustíveis alternativos disponíveis, bem como sua aplicabilidade, esse estudo oferece uma contribuição prática e teórica significativa para descarbonização marítima, abrangendo todo o setor naval.

Como trabalhos futuros, são propostas diversas opções. A primeira envolve um estudo de viabilidade técnica e econômica mais detalhado das soluções principais, incluindo simulações de desempenho, análise do ciclo de vida dos sistemas e avaliação dos custos totais de ciclo de vida. A segunda opção consiste em uma avaliação dos impactos ambientais das soluções, investigando mais profundamente não apenas as emissões diretas de CO<sub>2</sub>, mas também outros poluentes e os métodos de produção envolvidos. O terceiro ponto abrange

estudos sobre o desenvolvimento de infraestrutura e logística, explorando os requisitos necessários para suportar a implementação das novas tecnologias. Além disso, sugere-se a análise de cenários de consumo de combustíveis alternativos, considerando a autonomia das embarcações e as necessidades de manutenção das tecnologias propostas, garantindo a viabilidade prática de longo prazo. Por último, há a sugestão de estudos voltados para navios militares de grande porte, que realizam viagens de longa duração e para o exterior.

## 6 Referências bibliográficas

ABDEL-BASSET, M. et al. Evaluation of sustainable hydrogen production options using an advanced hybrid MCDM approach: A case study. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 5, p. 4567-4591, 2021.

ABDELKAREEM, Mohammad Ali et al. Environmental aspects of batteries. **Sustainable Horizons**, v. 8, p. 100074, 2023.

ABHIC. Um marco no mercado brasileiro. Associação Brasileira de Hidrogênio e Combustíveis Sustentáveis (ABHIC), 2024. Disponível em: <<https://abhic.org.br/>>. Acesso em: 10 mar. 2024.

ABS. Setting the Course to Low Carbon Shipping - View of the Value Chain. ABS, American Bureau of Shipping (ABS), 2021.

ABS. Requirements for fuel cell power systems for marine and offshore applications. American Bureau of Shipping (ABS), ago. 2023.

ABS. Ship energy efficiency measures: status and guidance. American Bureau of Shipping (ABS), 2024a.

ABS. Advisory on Hybrid Electric Power Systems. American Bureau of Shipping (ABS), 2024b.

AKBAŞ, H.; BILGEN, B. An integrated fuzzy QFD and TOPSIS methodology for choosing the ideal gas fuel at WWTPs. **Energy**, v. 125, p. 484-497, 2017.

ALAM, M. M.; MOHAMMAD, R.; HIRA, F. A. Selection of alternative marine fuel technology based on literature review by applying appropriate multi-criteria decision-making method. **Journal of Science, Technology and Innovation Policy**, v. 7, n. 2, p. 1-12, 2021.

AL-DOURI, A.; ALSUHAIBANI, A. S.; MOORE, M.; NIELSEN, R. B.; EL-BAZ, A. A.; EL-HALWAGI, M. M. Greenhouse gases emissions in liquified natural gas as a marine fuel: Life cycle analysis and reduction potential. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 100, n. 6, p. 1178-1186, 2022.

ALMEIDA, N. N.; SOUZA, C. C. T. Uma visão da gestão ambiental de meios navais nacionais a partir das normas da Marinha do Brasil. **Revista da Escola de Guerra Naval**. Periódicos de Estudos Estratégicos e de Defesa, v. 28, n. 3, 2022.

AMAZUL. PROSUB: Marinha inicia montagem de reator do protótipo de propulsão nuclear em Aramar. AMAZUL, 21 out. 2020. Disponível em: <<https://www.amazul.mar.mil.br/marinha-inicia-montagem-reator-prototipo-propulsao-nuclear-aramar>>. Acesso em: 10 mar. 2024.

AMAZUL. Importância do PNM. AMAZUL, 02 mai. 2022. Disponível em: <<https://www.amazul.mar.mil.br/node/60164#:~:text=O%20Programa%20Nuclear%20da%20Marinha,energia%20el%C3%A9trica%20com%20tecnologias%20nacionais>>. Acesso em: 20 dez. 2023.

AMPAH, J. D.; YUSUF, A. A.; AFRANE, S.; JIN, C.; LIU, H. Reviewing two decades of cleaner alternative marine fuels: Towards IMO's decarbonization of the maritime transport sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 320, 128871, 2021.

ANDERSSON, K.; BRYNOLF, S.; HANSSON, J.; GRAHN, M. Criteria and decision support for a sustainable choice of alternative marine fuels. **Sustainability**, v. 12, n. 9, 3623, 2020.

ANP. Resolução ANP nº 920, de 4 de abril de 2023. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 5 abr. 2023. Capítulo 1, Art. 3º, V. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

ANP. ANP autoriza comercialização de combustível marítimo com biodiesel. 15 jul. 2024a. Disponível em: <[https://www.gov.br/anp/pt-br/canais\\_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/anp-autoriza-comercializacao-de-combustivel-maritimo-com-biodiesel](https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/anp-autoriza-comercializacao-de-combustivel-maritimo-com-biodiesel)>. Acesso em: 09 set. 2024.

ANP. Preços de produtores e importadores de derivados de petróleo e biodiesel. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), 17 mai. 2024b. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-de-produtores-e-importadores-de-derivados-de-petroleo-e-biodiesel>>. Acesso em: 18 mai. 2024.

ANP. Síntese Semanal do Comportamento dos Preços dos Combustíveis. Edição nº 08/2024c. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

ANTAQ. Desempenho Aquaviário 2022. Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), 08 fev. 2023a. Disponível em: <<https://www.gov.br/antag/pt-br/noticias/2023/setor-portuario-movimentamais-de-1-2-bilhao-de-toneladas-em-2022/apresentacao-desempenho-aquaviario-2022>>. Acesso em: 10 jan. 2024.

ANTAQ. ANTAQ e GIZ celebram ACT para desenvolvimento de estudo sobre descarbonização dos portos. Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), 18 set. 2023b. Disponível em: <<https://www.gov.br/antag/pt-br/noticias/2023/antag-e-giz-celebram-act-para-desenvolvimento-de-estudo-sobre-descarbonizacao-dos-portos-1>>. Acesso em: 17 jan. 2024.

ARABNEJAD, Mohammad Hossein et al. Zero-emission propulsion system featuring, Flettner rotors, batteries and fuel cells, for a merchant ship. **Ocean Engineering**, v. 310, p. 118618, 2024.

BALDI, Francesco et al. The role of solid oxide fuel cells in future ship energy systems. **Energy**, v. 194, p. 116811, 2020.



BANASZKIEWICZ, T.; CHOROWSKI, M.; GIZICKI, W.; JEDRUSYNA, A.; KIELAR, J.; MALECHA, Z.; DOWŻENKO, P. Liquefied natural gas in mobile applications—opportunities and challenges. **Energies**, v. 13, n. 21, p. 5673, 2020.

BAREŠIĆ, D.; PRAKASH, V.; STEWART, J.; REHMATULLA, N.; SMITH, T. Climate Action in Shipping: Progress towards Shipping's 2030 Breakthrough. Colaboração de UMAS e UN Climate Change High Level Champions, 17 nov. 2023.

BAYRAKTAR, M.; PAMIK, M. U. R. A. T. Nuclear power utilization as a future alternative energy on icebreakers. **Nuclear Engineering and Technology**, v. 55, n. 2, p. 580-586, 2023.

BAYRAKTAR, M.; YÜKSEL, O. Analysis of the nuclear energy systems as an alternative propulsion system option on commercial marine vessels by utilizing the SWOT-AHP method. **Nuclear Engineering and Design**, v. 407, p. 112265, 2023.

BEHYDRO. Port of Antwerp-Bruges & CMB.TECH launch the Hydrotug 1, world's first hydrogen-powered tugboat. BeHydro, 12 dez. 2023. Disponível em: <<https://www.behydro.com/news-events/launch-hydrotug-1>>. Acesso em: 10 mai. 2024.

BEHYDRO. Dual-fuel and 100% hydrogen engines. BeHydro, 2024. Disponível em: <<https://www.behydro.com/engines>>. Acesso em: 20 mai. 2024.

BEHZADIAN, M.; OTAGHSARA, S. K.; YAZDANI, M.; IGNATIUS, J. A state-of the-art survey of TOPSIS applications. **Expert Systems with applications**, v. 39, n. 17, p. 13051-13069, 2012.

BELSITO, L. C. M. Operação RO-RO – O que é e como são realizadas?. Lachmann, 11 jan. 2023. Disponível em: <<https://www.lachmann.com.br/operacao-ro-ro-o-que-e-e-como-sao-realizadas/#:~:text=Opera%C3%A7%C3%A3o%20RO%2DRO%20traz%20a,descarga%20dos%20ve%C3%ADculos%20e%20cargas>>. Acesso em: 01 abr. 2024.

BENBASAT, I.; GOLDSTEIN, D. K.; MEAD, M. The case research strategy in studies of information systems. **MIS Quarterly**, v. 11, n. 3, p. 369-386, set. 1987.

BERNASCONI, M.; CHOIRAT, C.; SERI, R. Empirical properties of group preference aggregation methods employed in AHP: Theory and evidence. **European Journal of Operational Research**, v. 232, n. 3, p. 584-592, 2014.

BHATTACHARYYA, R.; EL-EMAM, R. S.; KHALID, F. Climate action for the shipping industry: Some perspectives on the role of nuclear power in maritime decarbonization. e-Prime - Advances in Electrical Engineering, **Electronics and Energy**, v. 4, p. 100132, 2023.

BIODIESELBR. Propriedades Físicas e Químicas do Biodiesel. BiodieselBR, 09 nov. 2011. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/biodiesel/especificacoes/biodiesel-propriedades-fisicas-quimicas>>. Acesso em: 24 jan. 2024.

BIODIESELBR. Helm Proman Methanol aumentando presença. BiodieselBR, 31 out. 2022. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/noticias/usinas/insumo/hpm-aumentando-a-presenca-281022>>. Acesso em: 20 dez. 2023.

BIODIESELBR. Metanol fica mais caro em novembro, depois de 3 meses de estabilidade. BiodieselBR, 07 nov. 2023a. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/noticias/usinas/insumo/metanol-fica-mais-caro-em-novembro-depois-de-3-meses-de-estabilidade-071123>>. Acesso em: 15 abr. 2024.

BIODIESELBR. Petrobras amplia testes com mistura entre biodiesel e bunker marítimo. BiodieselBR, 28 jun. 2023b. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/noticias/usinas/info/petrobras-amplia-testes-com-mistura-entre-biodiesel-e-bunker-maritimo-280623>>. Acesso em: 05 dez. 2023.

BNDES. Hub de Projetos. Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Sustentável (BNDES), 2024. Disponível em: <<https://hubdeprojetos.bndes.gov.br/pt/setores/Portos>>. Acesso em: 08 jan. 2024.

BNDES. Biodiesel and Renewable diesel in Brazil: recent overview and perspectives. Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Sustentável (BNDES). Set. Rio de Janeiro, v. 28, n. 56, p. 41-71, set. 2022a.

BNDES. BNDES reduz juros e aprova novas regras do programa para descarbonização no setor de combustíveis. Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Sustentável (BNDES), 01 dez. 2022b. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/bndes-reduz-juros-e-aprova-novas-regras-do-programa-para-descarbonizacao-no-setor-de-combustiveis>>. Acesso em: 20 nov. 2023.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 27 dez. 2017.

BRASIL. Marinha do Brasil. Diretoria de Portos e Costas. NORTAM-02: Norma Técnica Ambiental sobre Sistema de Gestão Ambiental nas Organizações Militares de Terra. 2 ed. Rio de Janeiro, 2021.

BRASIL. Marinha do Brasil. Missão e visão de futuro. Marinha do Brasil, 2016a. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/content/missao-e-visao-de-futuro-da-marinha>>. Acesso em: 12 dez. 2023.

BRASIL. Ministério da Defesa. Defesa e Meio Ambiente: Preparo com Sustentabilidade. 15 p., 2016b.

- BRASIL. Marinha do Brasil. Portos e Costas: Gestão Ambiental na Marinha. Marinha do Brasil, 2024a. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dpc/node/3520>>. Acesso em: 05 jan. 2024.
- BRASIL. Marinha do Brasil. Portos e Costas: Atribuições da DPC. Marinha do Brasil, 2024b. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dpc/node/3519>>. Acesso em: 05 jan. 2024.
- BRASIL. Marinha do Brasil. Centro Tecnológico da Marinha no Rio de Janeiro. Marinha do Brasil, 2024c. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/ctmrj/historico>>. Acesso em: 02 fev. 2024.
- BRASIL. Marinha do Brasil. Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo: Labgene. Marinha do Brasil, 2024d. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/ctmsp/labgene>>. Acesso em: 15 mar. 2024
- BRASIL. Ministério da Defesa. Livro Branco de Defesa Nacional. 9 p., 2020a.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Política Nacional de Defesa, 2020b.
- CAMARGO-DÍAZ, C. P.; PAIPA-SANABRIA, E.; ZAPATA-CORTES, J. A.; AGUIRRE-RESTREPO, Y.; QUIÑONES-BOLAÑOS, E. E. A Review of Economic Incentives to Promote Decarbonization Alternatives in Maritime and Inland Waterway Transport Modes. *Sustainability*, v. 14, n. 21, p. 14405, 2022.
- CAMPBELL, M., DAVIES, A., MACLEAN, G., MARTIN, C., RAUGEI, M., SCAMMELL, H. Sustainable criteria and life cycle GHG emission assessment methods and standards for alternative marine fuels. Report for the IMO Low Carbon Global Industry Alliance. **Ricardo Energy & Environment**, 06 dez. 2021.
- CARNEIRO, M. N. M. et al. Potential of biofuels from algae: Comparison with fossil fuels, ethanol and biodiesel in Europe and Brazil through life cycle assessment (LCA). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, p. 632-653, 2017.
- CARVALHO, F.; MÜLLER-CASSERES, E.; POGGIO, M.; NOGUEIRA, T.; FONTE, C.; WEI, H. K.; ...& SCHAEFFER, R. Prospects for carbon-neutral maritime fuels production in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 326, p. 129385, 2021.
- CASTRO, N. D.; BRAGA, S.; PRADELLE, F.; CHAVES, A.; CHANTRE, C. A Economia do Hidrogênio: Transição, Descarbonização e Oportunidades para o Brasil. **E-Papers Servicos Editoriais**, 2023.
- CEBRI. Alternativas de descarbonização para o setor de transporte marítimo no Brasil. Centro Brasileiro de Relações Internacionais (CEBRI), 2023.
- CHANDRASEKARAN, A.; LINDERMAN, K.; SCHROEDER, R. Antecedents to ambidexterity competency in high technology organizations. *Journal of Operations Management*, v. 30, n. 1-2, p. 134-151, 2012.
- CHANTRE, C. et al. Hydrogen economy development in Brazil: An analysis of stakeholders' perception. **Sustainable Production and Consumption**, v. 34, p. 26-41, 2022.

CHELIOTIS, M.; BOULOUGOURIS, E.; TRIVYZA, N. L.; THEOTOKATOS, G.; LIVANOS, G.; MANTALOS, G.; ...& VENETSANOS, A. Review on the safe use of ammonia fuel cells in the maritime industry. **Energies**, v. 14, n. 11, p. 3023, 2021.

CHEN, Xiaoyan; YANG, Jiakuan. Analysis of the uncertainty of the AIS-based bottom-up approach for estimating ship emissions. **Marine Pollution Bulletin**, v. 199, p. 115968, 2024.

CHEN, Yan. Dynamic ambidexterity: How innovators manage exploration and exploitation. **Business Horizons**, v. 60, n. 3, p. 385-394, 2017.

CHIONG, M. C.; KANG, H. S.; SHAHARUDDIN, N. M. R.; MAT, S.; QUEN, L. K.; TEN, K. H.; ONG, M. C. Challenges and opportunities of marine propulsion with alternative fuels.

**Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 149, p. 111397, 2021.

CHOU, T.; KOSMAS, V.; ACCIARO, M.; RENKEN, K. A comeback of wind power in shipping: An economic and operational review on the wind-assisted ship propulsion technology. **Sustainability**, v. 13, n. 4, p. 1880, 2021.

CIGGIN, A. S.; SARICA, E. S.; DOĞRUDEL, S.; ORHON, D. Impact of ultrasonic pretreatment on Fenton-based oxidation of olive mill wastewater - towards a sustainable treatment scheme. **Journal of Cleaner Production**, v. 313, p. 127948, 2021. doi:10.1016/j.jclepro.2021.127948.

CIOCA, L. I.; BREAZ, R. E.; RACZ, S. G. Selecting the safest CNC machining workshop using AHP and TOPSIS approaches. **Safety**, v. 7, n. 2, p. 27, 2021.

CLIMATE SCIENCE. Climate Science 2030. Climate Science, 2024. Disponível em: <<https://climatescience2030.com/pt-pt/>>. Acesso em: 01 dez. 2023.

CLS. CSL Successfully Completes World's Largest B100 Biofuel Tests. CLS, 09 dez. 2021. Disponível em: <<https://cslships.com/news/csl-successfully-completes-worlds-largest-b100-biofuel-tests/>>. Acesso em: 15 dez. 2023.

CNUDM. Decreto N° 1.530, de 22 de junho de 1995. Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM), 22 jun. 1995.

COOPER, H. M. Organizing Knowledge Synthesis: A Taxonomy of Literature Reviews. **Knowledge in Society**, v. 1, p. 104–126, 1988. doi:10.1007/BF03177550.

COPPE. Estudo mostra que hidrogênio pode tornar mais eficiente a produção de biocombustíveis. COOPE, 30 set. 2022. Disponível em: <<https://coppe.ufrj.br/planeta-coppe/estudo-mostra-que-hidrogenio-pode-tornar-mais-eficiente-a-producao-de-biocombustiveis/>>. Acesso em: 10 jan. 2024.

COȘOFREȚ, D.; AVRAM, E. R. Reducing GHG Emissions at Military Vessels. **Scientific Bulletin 'Mircea cel Batran' Naval Academy**, v. 23, n. 2, 2020.

CYCLE0. How is biomethane carbon neutral?. Cycle0, 16 nov. 2023. Disponível em: <https://www.cycle0.com/how-is-biomethane-carbon-neutral>. Acesso em: 16 abr. 2024.

DAMARTZIS, T.; ASIMAKOPOULOU, A.; KOUTSONIKOLAS, D.; SKEVIS, G.; GEORGOPOULOU, C.; DIMOPOULOS, G. et al.. Solvents for Membrane-Based Post-Combustion CO<sub>2</sub> Capture for Potential Application in the Marine Environment. **Applied Sciences**, v. 12, n. 12, p. 6100, 2022.

DAMIAN, S. E.; WONG, L. A.; SHAREEF, H.; RAMACHANDARAMURTHY, V. K.; CHAN, C. K.; MOH, T. S. Y et al.. Review on the challenges of hybrid propulsion system in marine transport system. **Journal of Energy Storage**, v. 56, p. 105983, 2022.

DA SILVA, M. G.; LISBÔA, A. C. L.; HOFFMANN, R.; DA CUNHA KEMERICH, P. D.; DE BORBA, W. F.; FERNANDES, G. D. Á.; DE SOUZA, É. E. B. Greenhouse gas emissions of rice straw-to-methanol chain in Southern Brazil. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 3, p. 105202, 2021.

DE JONG, P.; TORRES, E. A.; DE MELO, S. A. B. V.; MENDES-SANTANA, D.; PONTES, K. V. Socio-economic and environmental aspects of bio-LPG and bio-dimethyl ether (Bio-DME) production and usage in developing countries: The case of Brazil. **Cleaner and Circular Bioeconomy**, v. 6, p. 100055, 2023.

DE SOUZA; I. M. A.; MARTINS, J. V. S. C.; QUESADA, M.; COUTINHO N. VICTORIA, M. COP 28 e transição energética justa - Deixando os combustíveis fósseis para trás rumo à descarbonização. UNICEF, 15 jan. 2024. Disponível em: <https://www.unicef.org/brazil/blog/cop-28-e-transicao-energetica-justa>. Acesso em: 02 set. 2024.

DIAZ-BALTEIRO, L.; GONZÁLEZ-PACHÓN, J.; ROMERO, C. Measuring systems sustainability with multi-criteria methods: A critical review. **European Journal of Operational Research**, v. 258, n. 2, p. 607-616, 2017.

DNV. Rules for Classification-Ships. Part 6 Additional class notations Chapter 2 Propulsion, power generation and auxiliary systems. DNV, jul. 2020.

DNV. Alternative fuels for naval vessels. 11 mai. 2022. Disponível em: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Decarbonization-perspectives-for-navies/>. Acesso em: 15 mai. 2024.

DNV. Report Energy Transition Outlook 2023: Maritime Forecast to 2050. DNV, 2023.

DNV. CII – Carbon Intensity Indicator. DNV, 2024a. Disponível em: <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/CII-carbon-intensity-indicator/index.html>. Acesso em: 15 out. 2023.

DNV. Energy Efficient Design Index regulations. DNV, 2024b. Disponível em: <https://www.dnv.com/maritime/hub/decarbonize-shipping/key-drivers/regulations/imo-regulations/eexi/>. Acesso em: 10 set. 2024.

DNV. EEXI – Energy Efficiency Existing Ship Index. DNV, 2024c. Disponível em:

<<https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/eexi/>>. Acesso em: 10 set. 2024.

DOKHANI, Sepanta; ASSADI, Mohsen; POLLET, Bruno G. Techno-economic assessment of hydrogen production from seawater. **international journal of hydrogen energy**, v. 48, n. 26, p. 9592-9608, 2023.

DOS SANTOS, V. A.; PEREIRA DA SILVA, P.; SERRANO, L. M. V. The Maritime Sector and Its Problematic Decarbonization: A Systematic Review of the Contribution of Alternative Fuels. **Energies**, v. 15, n. 10, p. 3571, 2022.

DROSIŃSKA-KOMOR, M.; GŁUCH, J.; BREŃKACZ, Ł.; ZIÓŁKOWSKI, P. On the use of selected 4th generation nuclear reactors in marine power plants. **Polish Maritime Research**, v. 29, n. 1, p. 76-84, 2022.

DUONG, Phan Anh et al. A novel designation of LNG solid oxide fuel cells combined system for marine application. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 58, p. 104433, 2024.

DUSHEV, S. A.; TIMOFEEV, A. V.; ERMAKOV, A. V.; DANILOV, S. D.; PLOTNIKOV, I. V.; ABROSIMOV, A. D. Refueling Complexes and Equipment for Civilian and Naval Ship Reactor Installations: Creation and Development. **Atomic Energy**, v. 129, n. 2, p. 80-86, 2020.

EICHLER, P.; SANTOS, F.; TOLEDO, M.; ZERBIN, P.; SCHMITZ, G.; ALVES, C et al. Biomethanol production via gasification of lignocellulosic biomass. **Química Nova**, v. 38, p. 828-835, 2015.

EIDESVIK. Viking Energy with ammonia-driven fuel cell. Disponível em: <<https://eidesvik.no/viking-energy-with-ammonia-driven-fuel-cell/>>. Acesso em: 16 nov. 2023, 2020.

EMSA. Potential of Wind-Assisted Propulsion for Shipping. European Maritime Safety Agency (EMSA), 27 nov. 2023a.

EMSA. EMSA Guidance on the Safety of Battery Energy Storage Systems (BESS) on board ships. European Maritime Safety Agency (EMSA), nov. 2023b.

ENERGY OBSERVER. Energy Observer 2, a demonstrator vessel that runs on liquid H<sub>2</sub>. Energy Observer, 2024. Disponível em: <<https://www.energy-observer.org/resources/energy-observer-2-liquid-hydrogen>>. Acesso em: 29 jan. 2024.

EPBR. Resumo da COP 28: o Sistema Financeiro em evidência para a consolidação da nova economia. 14 dez. 2023. Disponível em: <<https://epbr.com.br/resumo-da-cop-28-o-sistema-financeiro-em-evidencia-para-a-consolidacao-da-nova-economia/>>. Acesso em: 20 dez. 2023.

EPE. IMO 2020: A nova regulamentação de combustíveis marítimos. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), ago. 2019. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-447/EPE\\_MME\\_COMBUST%C3%8DVEIS%20MAR%C3%8DTIMOS%20E%20IMO%202020\\_2019.08.08%20-.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-447/EPE_MME_COMBUST%C3%8DVEIS%20MAR%C3%8DTIMOS%20E%20IMO%202020_2019.08.08%20-.pdf)>. Acesso em: 20 jul. 2023.

EPE. Terminais de GNL no Brasil: Panorama dos principais projetos - Ciclo 2019-2020. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), out. 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-527/NT%20Terminais%20de%20GNL%20no%20Brasil%20-%20Panorama%20dos%20Principais%20Projetos.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2023.

EPE. Matriz Energética e Elétrica. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 03 dez. 2023.

FAN, A.; LI, Y.; LIU, H.; YANG, L.; TIAN, Z.; LI, Y.; VLADIMIR, N. Development trend and hotspot analysis of ship energy management. **Journal of Cleaner Production**, p. 135899, 2023.

FEIJOO, A. M. L. C. A pesquisa e a estatística na psicologia e na educação. 2010.

FERREIRA, A. L. Estudo mostra que etanol de cana emite menos gás carbônico para a atmosfera do que a gasolina. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), 01 abr. 2009. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/18044516/estudo-mostra-que-etanol-de-cana-emite-menos-gas-carbonico-para-a-atmosfera-do-que-a-gasolina>>. Acesso em: 05 abr. 2024.

FILHO, W. L.; VIDAL, D. G.; DINIS, M. A. P.; et al. Low carbon futures: assessing the status of decarbonisation efforts at universities within a 2050 perspective. **Energy, Sustainability and Society**, v. 13, n. 1, p. 1-17, 2023.

FIVGA, A.; SPERANZA, L. G.; BRANCO, C. M.; OUADI, M.; HORNUNG, A. A review on the current state of the art for the production of advanced liquid biofuels. **Aims Energy**, v. 7, n. 1, p. 46-76, 2019.

FERRER, A. L. C.; THOMÉ, A. M. T. Carbon emissions in transportation: A synthesis framework. **Sustainability**, v. 15, n. 11, p. 8475, 2023.

FORBES. Raízen e Wartsila pesquisarão uso de etanol no transporte marítimo. 17 out. 2023. Disponível em: <<https://forbes.com.br/sem-categoria/2023/10/raizen-e-wartsila-pesquisarao-uso-de-etanol-no-transporte-maritimo/>>. Acesso em: 02 set. 2024.

FORMAN, E.; PENIWATI, K. Aggregating individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process. **European journal of operational research**, v. 108, n. 1, p. 165-169, 1998.

FREITAS, W. R.; JABBOUR, C. J. Utilizando estudo de caso(s) como estratégia de pesquisa qualitativa: boas práticas e sugestões. **Revista Estudo & Debate**, v. 18, n. 2, 2011.

FUTURE FUELS. Mixing biofuels and VLSFOs might lead to stability/compatibility issues. *Future Fuels*, 15 dez. 2021. Disponível em: <<https://futurefuels.in/mixing-biofuels-and-vlsfos-might-lead-to-stability-compatibility-issues/>>. Acesso em: 14 de mai. de 2024.

GAGATSI, E.; ESTRUP, T.; HALATSIS, A. Exploring the potentials of electrical waterborne transport in Europe: the E-ferry concept. ***Transportation Research Procedia***, v. 14, p. 1571-1580, 2016.

GALANTE, A. O Prosub e o submarino nuclear brasileiro SN-BR. *Poder Naval*, 20 fev. 2018. Disponível em: <<https://www.naval.com.br/blog/2018/02/20/o-prosub-e-o-submarino-nuclear-brasileiro-sn-br/>>. Acesso em: 05 set. 2024.

GÖSSLING, S.; MEYER-HABIGHORST, C.; HUMPE, A. A global review of marine air pollution policies, their scope and effectiveness. ***Ocean & Coastal Management***, v. 212, p. 105824, 2021.

GUSTAFSSON, M.; SVENSSON, N. Cleaner heavy transports—Environmental and economic analysis of liquefied natural gas and biomethane. ***Journal of Cleaner Production***, v. 278, p. 123535, 2021.

HA, S.; JEONG, B.; JANG, H.; PARK, C.; KU, B. A framework for determining the life cycle GHG emissions of fossil marine fuels in countries reliant on imported energy through maritime transportation: A case study of South Korea. ***Science of The Total Environment***, v. 897, p. 165366, 2023.

HABIBIC, A. Nordsol's new plant getting closer to supplying bio-LNG to maritime sector. *Offshore Energy*, 13 fev. 2024. Disponível em: <<https://www.offshore-energy.biz/nordsols-new-plant-getting-closer-to-supplying-bio-Ing-to-maritime-sector/>>. Acesso em: 20 de mai. de 2024.

HANSSON, J.; MÅNSSON, S.; BRYNOLF, S.; GRAHN, M. Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders. ***Biomass and Bioenergy***, v. 126, p. 159-173, 2019.

HE, W.; VALØEN, L. O.; OLSEN, K. V.; KJEKA, K. M.; FREDRIKSEN, B. M.; PETITEAU, M.; ...; HAMMERSHØJ, C. F. Lessons learned from the commercial exploitation of marine battery energy storage systems. ***Journal of Energy Storage***, v. 87, p. 111440, 2024.

HEIN, H. Brasil tem nova associação com foco em hidrogênio e combustíveis sustentáveis. *Canal Solar*, 01 de ago. de 2023. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/brasil-tem-nova-associacao-com-foco-em-hidrogenio-e-combustiveis-sustentaveis/>>. Acesso em: 12 abr. 2024.

HUANG, J.; DUAN, X. A comprehensive review of emission reduction technologies for marine transportation. ***Journal of Renewable and Sustainable Energy***, v. 15, n. 3, 2023.

IEA. Biofuels for the marine shipping sector. International Energy Agency (IEA), out. de 2017.

IEA. Global Energy Transitions Stocktake. International Energy Agency (IEA), 2023a. Disponível em: <<https://www.iea.org/topics/global-energy-transitions-stocktake>>. Acesso em: 05 jan. 2024.



IEA. Global Hydrogen Review 2023. International Energy Agency (IEA), dez. 2023b.

IHU. Principal indicador da crise climática: concentração de CO2 bate recorde em março de 2024. Instituto Humanitas Unisinos, 10 abr. 2024. Disponível em: <<https://www.ihu.unisinos.br/categorias/638236-principal-indicador-da-crise-climatica-concentracao-de-co2-bate-recorde-em-marco-de-2024>>. Acesso em: 02 set. 2024.

IMO. Fourth greenhouse gas study 2020. International Maritime Organization (IMO), 2020. Disponível em: <<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>>. Acesso em: 01 mai. 2023.

IMO. 2023 IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships. Resolution MEPC.377(80), ANNEX 15. International Maritime Organization (IMO), 07 jul. 2023a.

IMO. Submission of the International Maritime Organization to the first global stocktake. International Maritime Organization (IMO), 2023b. Disponível em: <<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/IMO-at-COP-28.aspx>>. Acesso em: 20 de nov. de 2023.

IMO. Introduction to IMO. International Maritime Organization (IMO), 2024a. Disponível em: <<https://www.imo.org/en/About/Pages/Default.aspx>>. Acesso em: 25 mai. 2023.

IMO. Members States. International Maritime Organization (IMO), 2024b. Disponível em: <<https://www.imo.org/en/OurWork/ERO/Pages/MemberStates.aspx>>. Acesso em: 20 mai. 2023.

IMO. Improving the energy efficiency of ships. International Maritime Organization (IMO), 2024c. Disponível em: <<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Improving%20the%20energy%20efficiency%20of%20ships.aspx>>. Acesso em: 20 ago. 2023.

IMO. About IMO - "How is IMO structured?". International Maritime Organization (IMO), 2024d. Disponível em: <<https://www.imo.org/en/About/Pages/FAQs.aspx>>. Acesso em: 10 jan. 2024.

IMO. IMO and the Sustainable Development Goals. International Maritime Organization, (IMO), 2024e. Disponível em: <<https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/SustainableDevelopmentGoals.aspx>>. Acesso em: 25 mai. 2023.

IMO. EEXI and CII - ship carbon intensity and rating system. International Maritime Organization (IMO), 2024f. Disponível em: <<https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/EEXI-CII-FAQ.aspx>>. Acesso em: 10 nov. 2023.

IMO. Guidelines on life cycle GHG intensity of marine fuels (LCA Guidelines). International Maritime Organization (IMO), 2024g. Disponível em: <<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Lifecycle-GHG--carbon-intensity-guidelines.aspx>>. Acesso em: 11 dez. 2023.

IMO. Market-Based Measures. International Maritime Organization (IMO), 2024h. Disponível em: <<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Market-Based-Measures.aspx>>. Acesso em: 15 de nov. de 2023.

IMO. Future fuels and Technology Projec: What are suction wings and how do they work. International Maritime Organization (IMO), 2024i. Disponível em: <<https://futurefuels.imo.org/faq/what-are-suction-wings-and-how-do-they-work/>>. Acesso em: 02 fev. 2024.

INAL, O. B.; CHARPENTIER, J. F.; DENIZ, C. Hybrid power and propulsion systems for ships: Current status and future challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 156, p. 111965, 2022.

INGRAO, C. et al. How can life cycle thinking support sustainability of buildings? Investigating life cycle assessment applications for energy efficiency and environmental performance. **Journal of cleaner production**, v. 201, p. 556-569, 2018.

IPCC. IPCC 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001, 2023.

IRENA. Tripling Renewable power and doubling energy efficiency by 2030. International Renewable Energy Agency (IRENA), 2023a. Disponível em: <[https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Oct/COP28\\_IRENA\\_GRA\\_Tripling\\_renewables\\_doubling\\_efficiency\\_2023.pdf?rev=9831037db9e44aa5976b582af19a90da](https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Oct/COP28_IRENA_GRA_Tripling_renewables_doubling_efficiency_2023.pdf?rev=9831037db9e44aa5976b582af19a90da)>. Acesso em: 11 dez. 2023.

IRENA. Innovative Policymaking is Crucial to Drive Green Hydrogen Market and Ensure its Sustainable Production. International Renewable Energy Agency (IRENA), 10 dez. 2023b. Disponível em: <<https://www.irena.org/News/articles/2023/Dec/Innovative-Policymaking-is-Crucial-to-Drive-Green-Hydrogen-Market-and-Ensure-Sustainable-Production>>. Acesso em: 12 jan. 2024.

IRENA. Solar energy. International Renewable Energy Agency (IRENA). 11 jul. 2024a. Disponível em: <<https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Solar-energy>>. Acesso em: 01 set. 2024.

IRENA. Wind energy. International Renewable Energy Agency (IRENA). 11 jul. 2024b. Disponível em: <<https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy>>. Acesso em: 01 set. 2024.

IRENA; WTO. International trade and green hydrogen: Supporting the global transition to a low-carbon economy. International Renewable Energy Agency (IRENA) e World Trade Organization (WTO), 2023. Disponível em: <[https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Dec/IRENA\\_WTO\\_International\\_trade\\_green\\_hydrogen\\_2023.pdf?rev=5478e0e6ebb141c5a8f9395b1](https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Dec/IRENA_WTO_International_trade_green_hydrogen_2023.pdf?rev=5478e0e6ebb141c5a8f9395b1)>. Acesso em: 14 jan. 2024.

ISSA, M.; ILINCA, A.; MARTINI, F. Ship Energy Efficiency and Maritime Sector Initiatives to Reduce Carbon Emissions. **Energies**, v. 15, n. 21, p. 7910, 2022.

JELIĆ, M.; MRZLJAK, V.; RADICA, G.; RAČIĆ, N. An alternative and hybrid propulsion for merchant ships: Current state and perspective. **Energy Sources**, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, p. 1-33, 2021.

JOHNSON, E. A carbon footprint of HVO biopropane. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 11, n. 5, p. 887-896, 2017.

JOHNSON, E. Process technologies and projects for BioLPG. **Energies**, v. 12, n. 2, p. 250, 2019.

KARVOUNIS, P.; TSOUMPRIS, C.; BOULOUGOURIS, E.; THEOTOKATOS, G. Recent advances for sustainable and safe marine engines operation with alternative fuels. **Frontiers in Mechanical Engineering**, v. 8, 2022.

KEELE, S. Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering (Vol. 5). **Technical report**, ver. 2.3 ebse technical report. ebse, 2007.

KHEIRINIK, M.; AHMED, S.; RAHMANIAN, N. Comparative techno-economic analysis of carbon capture processes: Pre-combustion, post-combustion, and oxy-fuel combustion operations. **Sustainability**, v. 13, n. 24, p. 13567, 2021.

KIM, J. K.; JEONG, B.; CHOI, J. H.; LEE, W. J. Life cycle assessment of LPG engines for small fishing vessels and the applications of bio LPG fuel in Korea. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 11, n. 8, p. 1488, 2023.

KIM, J. K.; YEO, S.; CHOI, J. H.; LEE, W. J. LPG, Gasoline, and Diesel Engines for Small Marine Vessels: A Comparative Analysis of Eco-Friendliness and Economic Feasibility. **Energies**, v. 17, n. 2, p. 450, 2024.

KOŁODZIEJSKI, M.; MICHALSKA-POZOĞA, I. Battery Energy Storage Systems in Ships' Hybrid/Electric Propulsion Systems. **Energies**, v. 16, n. 3, p. 1122, 2023.

KORYAK, O.; LOCKETT, A.; HAYTON, J.; NICOLAOU, N.; MOLE, K. Disentangling the antecedents of ambidexterity: Exploration and Exploitation. **Research Policy**, v. 47, p. 413-427, 2018.

KOVACOVA, M.; LĂZĂROIU, G. Sustainable organizational performance, cyber-physical production networks, and deep learning-assisted smart process planning in industry 4.0-based manufacturing systems. **Econ Manag Financ Mark**, v. 16, p. 41-54, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.22381/emfm16320212>.

KRČUM, M.; ZUBČIĆ, M.; GUDELJ, A. A Review and Comparison of Ship Power Simulation Methods. **NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo**, v. 65, n. 4 Special issue, p. 284-292, 2018.

LAGOUVARDOU, S.; PSARAFTIS, H. N.; ZIS, T. A literature survey on market-based measures for the decarbonization of shipping. **Sustainability**, v. 12, n. 10, p. 3953, 2020.

LANNON, C. & GONÇALVES, J. R. Tamanho de três campos de futebol, propulsão nuclear e caça 'invisível': saiba mais sobre porta-aviões americano que chegou ao Rio. TV Globo, G1 Rio, 21 mai. 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2024/05/21/tamanho-de-tres-campos-de-futebol-propulsao-nuclear-e-caca-invisivel-saiba-mais-sobre-porta-avioes-americano-que-chegou-ao-rio.ghtml>. Acesso em: 03 set. 2024.

LI, J. C.; XU, H.; ZHOU, K.; LI, J. Q. A review on the research progress and application of compressed hydrogen in the marine hydrogen fuel cell power system. **Heliyon**, 2024.

LINDSTAD, E. Alternative fuels versus traditional fuels in shipping. In: **SNAME International Symposium on Ship Operations, Management and Economics**. SNAME, 2018, pp. SNAME-SOME.

LUCIANA, T. A.; GASPAROTTI, C.; RUSU, E.. Green fuels—A new challenge for marine industry. **Energy Reports**, v. 7, p. 127-132, 2021.

MACHADO, N. O combustível do transporte de CO2 será descarbonizado? EPBR, 08 set. 2023. Disponível em: <https://epbr.com.br/o-combustivel-do-transporte-de-co2-sera-descarbonizado/>. Acesso em: 26 jan. 2024.

MACHAJ, K.; KUPECKI, J.; MALECHA, Z.; MORAWSKI, A. W.; SKRZYPKIEWICZ, M.; STANCLIK, M.; CHOROWSKI, M. Ammonia as a potential marine fuel: A review. **Energy Strategy Reviews**, v. 44, p. 100926, 2022.

MAERSK. Svitzer to pioneer methanol fuel cell tug operations. Maersk, 09 nov. 2021. Disponível em: <https://www.maersk.com/news/articles/2021/11/09/svitzer-to-pioneer-methanol-fuel-cell-tug-operations>. Acesso em: 15 nov. 2023.

MAERSK. A.P. Moller - Maersk engages in strategic partnerships across the globe to scale green methanol production by 2025. Maersk, 10 mar. 2022. Disponível em: <https://www.maersk.com/news/articles/2022/03/10/maersk-engages-in-strategic-partnerships-to-scale-green-methanol-production>. Acesso em: 15 nov. 2023.

MAERSK. Maersk signs MOU with Shanghai International Port Group on green methanol bunkering. Maersk, 24 mar. 2023a. Disponível em: <<https://www.maersk.com/news/articles/2023/03/24/maersk-signs-mou-with-shanghai-international-port-group-on-green-methanol-bunkering>>. Acesso em: 10 nov. 2023.

MAERSK. Equinor and Maersk partner up to ensure continued green methanol supply for the world's first methanol-enabled container vessel. Maersk, 08 set. 2023b. Disponível em: <<https://www.maersk.com/news/articles/2023/09/08/equinor-and-maersk-partner-to-supply-first-methanol-enabled-container-vessel>>. Acesso em: 10 nov. 2023.

MAERSK. Maersk orders six methanol powered vessels. Maersk, 26 jun. 2023c. Disponível em: <<https://www.maersk.com/news/articles/2023/06/26/maersk-orders-six-methanol-powered-vessels>>. Acesso em: 10 nov. 2023.

MAJUMDAR, B. B.; DISSANAYAKE, D.; RAJPUT, A. S.; SAW, Y. Q.; SAHU, P. K. Prioritizing metro service quality attributes to enhance commuter experience: TOPSIS ranking and importance satisfaction analysis methods. **Transportation Research Record**, v. 2674, n. 6, p. 124-139, 2020.

MALLOUPPAS, G.; YFANTIS, E. A. Decarbonization in shipping industry: A review of research, technology development, and innovation proposals. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 4, p. 415, 2021.

MALLOUPPAS, G.; IOANNOU, C.; YFANTIS, E. A. A Review of the Latest Trends in the Use of Green Ammonia as an Energy Carrier in Maritime Industry. **Energies**, v. 15, n. 4, p. 1453, 2022.

MALLOUPPAS, G.; YFANTIS, E. A.; IOANNOU, C.; PARADEISIOTIS, A.; KTORIS, A. Application of Biogas and Biomethane as Maritime Fuels: A Review of Research, Technology Development, Innovation Proposals, and Market Potentials. **Energies**, v. 16, n. 4, p. 2066, 2023.

MAN. MAN B&W two-stroke engines for LPG carriers. MAN, 2024a. Disponível em: <<https://www.man-es.com/marine/applications/lpg>>. Acesso em: 20 mai. 2024.

MAN. MAN B&W ME-GI prepares your fleet for future regulations. MAN, 2024b. Disponível em: <<https://www.man-es.com/marine/products/two-stroke-engines/me-gi>>. Acesso em: 20 mai. 2024.

MAN. MAN B&W ammonia engine development. MAN, 2024c. Disponível em: <<https://www.man-es.com/marine/products/two-stroke-engines/ammonia-engine>>. Acesso em: 21 mai. 2024.

MARCH, J. G. Exploration and exploitation in organizational learning. **Organization science**, v. 2, n. 1, p. 71-87, 1991.

MARTÍNEZ-LÓPEZ, A.; BALLESTER-FALCÓN, P.; MAZORRA-AGUIAR, L.; MARRERO, A. Solar photovoltaic systems for the Short Sea Shipping's compliance with decarbonization regulations in the European Union. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 60, p. 103506, 2023.

MCCARNEY, J. Evolution in the engine room: a review of technologies to deliver decarbonised, sustainable shipping. **Johnson Matthey Technology Review**, 2020.

MCCUTCHEON, D. M.; MEREDITH, J. R. Conducting case study research in operations management. **Journal of operations management**, v. 11, n. 3, p. 239-256, 1993.

MCTI. Acordo de Paris. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), 2017. Disponível em: <[https://repositorio.mcti.gov.br/bitstream/mctic/4968/2/2017\\_acordo\\_paris.pdf](https://repositorio.mcti.gov.br/bitstream/mctic/4968/2/2017_acordo_paris.pdf)>. Acesso em: 27 ago. 2023.

MDIC. Conselho antecipa maior percentual de biodiesel no diesel e incentiva transição energética. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC), 19 dez. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2023/dezembro/cnpe-aprova-antecipacao-do-b14-para-marco-de-2024-e-b15-para-marco-de-2025-incentivando-a-producao-de-biocombustiveis-e-a-transicao-energetica>>. Acesso em: 22 jul. 2024.

MECA V.L.; SANTIAGO O.; POSADA E.; D'AMORE-DOMENECH R.; VILLALBA-HERREROS A.; LEO T.J. Anode flow field design effect on direct methanol fuel cells. 36th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, **ECOS 2023**, pp. 1027 - 1033, 2023.

MELÓN, S. A. - Proposta de melhorias e de indicadores na gestão sustentável de resíduos provenientes de navios no Porto de Lisboa. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2018. Dissertação de mestrado.

MENDONÇA, V. BNDES Azul fomentará o crescimento econômico do País a partir do mar. Agência Marinha de Notícias (AMN), 24 jan. 2024. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/agenciadenoticias/bndes-azul-fomentara-o-crescimento-economico-do-pais-partir-do-mar#:~:text=BNDES%20AZUL%20fomentar%C3%A1%20o%20crescimento%20econ%C3%B4mico%20do%20Pa%C3%ADs%20a%20partir%20do%20mar,-Investimento%20estrat%C3%A9gico%20na&text=O%20Banco%20Nacional%20de%20Desenvolvimento,de%20investimentos%20intitulado%20BNDES%20AZUL>>. Acesso em: 17 fev. 2024.

MI. Zero-Emission Shipping Mission. Mission Innovation (MI), 2024. Disponível em: <<https://explore.mission-innovation.net/mission/zero-emissions-shipping/>>. Acesso em: 20 dez. 2023.

MITRI, M. E.; MAIA, S.; TEIXEIRA, A. P. F.; FORONI, L. Climatescope 2023 - Power Transition Factbook. BloombergNEF, nov. 2023.

MMA. Acordo de Paris. Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2024. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>>. Acesso em: 25 jul. 2023.

MME. Relatório Subcomitê Combustíveis Marítimos. Ministério de Minas e Energia (MME), 2022.

MME. Gordura animal é opção de baixo carbono para a produção de biodiesel. Ministério de Minas e Energia (MME), 31 ago. 2023a. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/gordura-animal-e-opcao-de-baixo-carbono-para-a-producao-de-biodiesel>>. Acesso em: 22 jul. 2024.

MME. COP 28: "Crescimento do mercado de biocombustíveis vai atrair mais de R\$ 200 bilhões até 2037", diz Silveira. Ministério de Minas e Energia (MME), 04 dez. 2023b. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/cop-28-crescimento-do-mercado-de-biocombustiveis-vai-atrair-mais-de-r-200-bilhoes-ate-2037-diz-silveira>>. Acesso em: 05 abr. 2024.

MME. COP 28: Brasil assina declarações para certificação e comércio de hidrogênio. Ministério de Minas e Energia (MME), 05 dez. 2023c. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/cop-28-brasil-assina-declaracoes-para-certificacao-e-comercio-de-hidrogenio#:~:text=Uma%20das%20declara%C3%A7%C3%B5es%20prop%C3%B5e%20o,no%20dia%2028%20de%20novembro>>. Acesso em: 20 mar. 2024.

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D.G.; PRISMA GROUP. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. **PLoS Med.**, v. 6, n. 7, e1000097, 2009.

MUELLER, N.; WESTERBY, M.; NIEUWENHUIJSEN, M. Health impact assessments of shipping and port-sourced air pollution on a global scale: A scoping literature review. **Environ. Res.**, v. 212, p. 114460, 2023.

MUKHERJEE, A.; BRUIJNINCX, P.; JUNGINGER, M. A perspective on biofuels use and CCS for GHG mitigation in the marine sector. **IScience**, v. 23, n. 11, 101758, 2020.

NEI. Taking the Investment Pulse: Q3 2023. Maritime industry explores nuclear power for ships as technology opens up (Reuters). **Nuclear Energy Institute (NEI)**, 19 set. 2023. Disponível em: <<https://www.nei.org/news/2023/taking-the-investment-pulse-q3-2023/>>. Acesso em: 16 abr. 2024.

NEULING, U.; KALTSCHMITT, M. Review of biofuel production-Feedstock, processes and markets. **Journal of Oil Palm Research**, v. 29, p. 137-167, 2017. Doi: <https://doi.org/10.21894/JOPR.2017.2902.01>

NEVES, J. Metanol - Biocombustível altamente inflamável utilizado nas indústrias petroquímicas. Educa Mais Brasil, 22 jul. 2020. Disponível em: <<https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/quimica/metanol>>. Acesso em: 02 mai. 2024.

NGUYEN, H. P.; HOANG, A. T.; NIZETIC, S.; NGUYEN, X. P.; LE, A. T.; LUONG, C. N., et al. The electric propulsion system as a green solution for management strategy of CO<sub>2</sub> emission in ocean shipping: A comprehensive review. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, v. 31, n. 11, e12580, 2021.

NNSA. The United States Naval Nuclear Propulsion Program 2020. National Nuclear Security Administration (NNSA), 2020.

OLANIYI, E. O.; PRAUSE, G. Investment analysis of waste heat recovery system installations on ships' engines. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 8, n. 10, p. 811, 2020.

OFFICE OF NUCLEAR ENERGY. TRISO Particles: The Most Robust Nuclear Fuel on Earth. Office of Nuclear Energy, 09 jul. 2019. Disponível em: <<https://www.energy.gov/ne/articles/triso-particles-most-robust-nuclear-fuel-earth>>. Acesso em: 15 abr. 2024.

OLIVEIRA, D. NPa 500 ajudará a medir a capacidade de nacionalização da indústria. Portos e Navios, 28 ago. 2023. Disponível em: <<https://www.portosenavios.com.br/noticias/especial-navalshore/npa-500-ajudara-a-medir-capacidade-de-nacionalizacao-da-industria>>. Acesso em: 02 nov. 2023.

ORYSIK, E.; ZIELSKI, H.; GAWLE, M.. LNG Logistics Model to Meet Demand for Bunker Fuel. **Energies**, v. 17, n. 7, p. 1758, 2024.

PACTO GLOBAL. Pacto Global da ONU no Brasil lança GT de Negócios Oceânicos para impulsionar a descarbonização de portos e transportes marítimos. Pacto Global, jul. 2023. Disponível em: <<https://www.pactoglobal.org.br/noticia/pacto-global-da-onu-no-brasil-lanca-gt-de-negocios-oceanicos-para-impulsionar-a-descarbonizacao-de-portos-e-transportes-maritimos/>>. Acesso em: 20 dez. 2023.

Poder Naval. IMAGENS: Porta-aviões 'Charles de Gaulle' (R91), chegando a Toulon. 20 abr. 2024. Disponível em: <<https://www.naval.com.br/blog/2024/04/20/imagens-porta-avioes-charles-de-gaulle-r91-chegando-a-toulon/>>. Acesso em: 03 set. 2024.

PADILHA, L. NPa 500 BR – O navio patrulha da Marinha. Defesa Aérea e Naval, 13 dez. 2016. Disponível em: <<https://www.defesaaereanaval.com.br/defesa/npa-500-br-o-navio-patrulha-da-marinha>>. Acesso em: 20 nov. 2023.

PERČIĆ, M.; FRKOVIĆ, L.; PUKŠEC, T.; ČOSIĆ, B., LI, O. L.; VLADIMIR, N. Life-cycle assessment and life-cycle cost assessment of power batteries for all-electric vessels for short-sea navigation. **Energy**, v. 251, p. 123895, 2022.

PEREIRA, P. S.; MORAES, M. C. M. Posto de abastecimento de combustíveis: aspectos estruturais e documentais para a conformidade ambiental. **Revista Obras Civis**, v. 10, n. 1, p. 63-73, 2023.

PETROBRAS. Manual dos Combustíveis Marítimos. jan. 2021.



- PETROBRAS. Petrobras assina acordo com a European Energy para avaliação de oportunidades de negócios de e-metanol. Petrobras, 16 nov. 2023. Disponível em: <<https://agencia.petrobras.com.br/pt/negocio/petrobras-assina-acordo-com-a-european-energy-para-avaliacao-de-oportunidades-de-negocios-de-e-metanol-16-11-2023/>>. Acesso em: 18 nov. 2023.
- POPP, J.; LAKNER, Z.; HARANGI-RÁKOS, M.; FÁRI, M. The effect of bioenergy expansion: food, energy, and environment. **Renew Sustain Energy Rev**, v. 32, p. 559-578, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.056>.
- PORTO DO AÇU. Projetos renováveis. Porto do Açú. Disponível em: <<https://portodoacu.com.br/projetos-renovaveis/>>. Acesso em: 29 mai. 2024.
- PRIO. PRIO, Norwegian Cruise Line Holdings e World Fuel Services concluem com sucesso os primeiros testes com biocombustíveis avançados, produzidos e fornecidos em Portugal. PRIO, 09 fev. 2023. Disponível em: <[https://www.prio.pt/pt/prio-norwegian-cruise-line-holdings-e-world-fuel-services-concluem-com-sucesso-os-primeiros-testes-com-biocombustiveis-avancados-produzidos-e-fornecidos-em-portugal\\_361.html?idn=110](https://www.prio.pt/pt/prio-norwegian-cruise-line-holdings-e-world-fuel-services-concluem-com-sucesso-os-primeiros-testes-com-biocombustiveis-avancados-produzidos-e-fornecidos-em-portugal_361.html?idn=110)>. Acesso em: 10 mai. 2024.
- QI, J.; WANG, S.; PSARAFTIS, H. Bi-level optimization model applications in managing air emissions from ships: A review. **Communications in Transportation Research**, v. 1, p. 100020, 2021.
- RATNAYAKE, D. C.; HEWA, G. A.; KEMP, D. J.; AHMED, A. A. Application of multi-criteria decision-making methods to identification of soil moisture monitoring sites in an urban catchment in South Australia. **Water Science and Engineering**, v. 15, n. 4, p. 294-304, 2022.
- RCGI. Biometano tem a menor pegada de carbono entre diversos energéticos disponíveis. **Research Centre for Greenhouse Gas Innovation (RCGI)**, 2023. Disponível em: <<https://sites.usp.br/rcgi/br/biometano-tem-a-menor-pegada-de-carbono-entre-diversos-energeticos-disponiveis/>>. Acesso em: 10 abr. 2024.
- REN, Xusheng et al. Sustainability assessment and decision making of hydrogen production technologies: A novel two-stage multi-criteria decision making method. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 59, p. 34371-34384, 2020.
- REUTERS. Fincantieri SpA (FCT.MI). Reuters, 2024. Disponível em: <<https://www.reuters.com/markets/companies/FCT.MI>>. Acesso em: 13 abr. 2024.
- ROMNEY, A. K.; WELLER, S.; AS CONSENSUS. W. B. C. A Theory of Culture and Informant Accuracy. **American Anthropologist**, v. 88, p. 313-337, 1986.

ROUMIEH, I. Y.; ROCHA, M. S. Funcionamento do sistema de ventilação em instalações nucleares. Portal Engenharia e arquitetura, 05 jan. 2018. Disponível

em:<<https://www.engenhariaearquitetura.com.br/2018/01/funcionamento-do-sistema-de-ventilacao-em-instalacoes-nucleares>>. Acesso em: 05 set. 2024.

SAATY, T. L. The analytic hierarchy process (AHP). **The Journal of the Operational Research Society**, v. 41, n. 11, p. 1073-1076, 1980.

SAMMARTINO, W. A integração do sistema de gestão de recursos humanos com as estratégias organizacionais. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Administração da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SANTOS, N. D. S. A.; ROSO, V. R.; MALAQUIAS, A. C. T.; BAETA, J. G. C. Internal combustion engines and biofuels: Examining why this robust combination should not be ignored for future sustainable transportation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 148, 111292, 2021.

SAUL, J. Maritime industry explores nuclear power for ships as technology opens up. **Reuters**, 19 set. 2023. Disponível em: <<https://www.reuters.com/sustainability/maritime-industry-explores-nuclear-power-ships-technology-opens-up-2023-09-19/>>. Acesso em: 15 mar. 2024.

SCOPUS. Scopus: Comprehensive, multidisciplinary, trusted abstract and citation database. **Scopus**, 2024. Disponível em: <[https://www.elsevier.com/solutions/scopus?dgcid=RN\\_AGCM\\_Sourced\\_300005030](https://www.elsevier.com/solutions/scopus?dgcid=RN_AGCM_Sourced_300005030)>. Acesso em: 03 mai. 2023.

SDEC. Voltalia e Pernambuco assinam memorando de entendimento para desenvolvimento de H2V no porto de Suape. **Secretaria de Desenvolvimento Econômico (SDEC)**, 15 dez. 2023. Disponível em: <<http://www.sdec.pe.gov.br/blog/11-root/1960-voltaliaepernambucoassinammemorandodeentendimentoparadesenvolvimentodeh2vnoportodesuapa#:~:text=A%20Voltalia%20%C3%A9%20uma%20das,do%20hidrog%C3%AAnio%20verde%20no%20pa%C3%ADs>>. Acesso em: 20 fev. 2024.

SERRA, P.; FANCELLO, G. Towards the IMO's GHG goals: A critical overview of the perspectives and challenges of the main options for decarbonizing international shipping. **Sustainability**, v. 12, n. 8, p. 3220, 2020.

SHAGAR, V.; JAYASINGHE, S. G.; ENSHAEI, H. Effect of load changes on hybrid shipboard power systems and energy storage as a potential solution: A review. **Inventions**, v. 2, n. 3, p. 21, 2017.

SHELL. Decarbonizing shipping: All Hands on Deck 2.0 - Industry Perspectives. **Shell**, 2023.

- SHI, J.; ZHU, Y.; FENG, Y.; YANG, J.; XIA, C. A Prompt Decarbonization Pathway for Shipping: Green Hydrogen, Ammonia, and Methanol Production and Utilization in Marine Engines. **Atmosphere**, v. 14, n. 3, p. 584, 2023.
- SINGH, V. K.; SINGH, P.; KARMAKAR, M.; LETA, J.; MAYR, P. The journal coverage of Web of Science, Scopus and Dimensions: A comparative analysis. **Scientometrics**, v. 126, p. 5113-5142, 2021.
- SISNAVAL. NPa500-BR terá potencial para fornecimento a marinhas de outros países. **SISNAVAL**, 18 ago. 2021. Disponível em: <<http://sinaval.org.br/2021/08/npa500-br-tera-potencial-para-fornecimento-a-marinhas-de-outros-paises/>>. Acesso em: 20 jan. 2024.
- SHELARE, S. D.; BELKHODE, P. N.; NIKAM, K. C.; JATHAR, L. D.; SHAHAPURKAR, K.; SOUDAGAR, M. E. M. et al. Biofuels for a sustainable future: Examining the role of nano-additives, economics, policy, internet of things, artificial intelligence and machine learning technology in biodiesel production. **Energy**, p. 128874, 2023.
- SPEIRS, J.; BALCOMBE, P.; BLOMERUS, P.; STETTLER, M.; ACHURRA-GONZALEZ, P.; WOO, M. et al. Natural gas fuel and greenhouse gas emissions in trucks and ships. **Progress in Energy**, v. 2(1), p. 012002.
- STRANTZALI, Eleni; LIVANOS, Georgios A.; ARAVOSSIS, Konstantinos. A Comprehensive Multicriteria Evaluation Approach for Alternative Marine Fuels. **Energies**, v. 16, n. 22, p. 7498, 2023.
- SZKLO, A.; PORTUGAL-PEREIRA, J.; ROCHEDO, P. R.; SCHAEFFER, R.; CARVALHO, F.; MÜLLER-CASSERES, E. et al. Perspectivas de Produção de Combustíveis Marítimos de Emissão Neutra de Carbono no Brasil. Elaborated by Cenergia, PPE/COPPE, UFRJ, ICS, Rio de Janeiro, Brazil, 2020.
- TANUJAYA, B.; PRAHMANA, R. C. I.; MUMU, J.. Likert scale in social sciences research: Problems and difficulties. **FWU Journal of Social Sciences**, v. 16, n. 4, p. 89-101, 2022.
- TAY, Z. Y.; KONOVESSIS, D. Sustainable energy propulsion system for sea transport to achieve United Nations sustainable development goals: A review. **Discover Sustainability**, v. 4, n. 1, p. 20, 2023.
- TEIXEIRA, C. A. N.; COSTA, R. C.; MENDES, A. P. A.; ROCIO, M. A. R. A hora do biometano no Brasil. **Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Sustentável (BNDES)**, jan. 2024.
- TEN, K. H.; KANG, H. S.; SIOW, C. L.; GOH, P. S.; LEE, K. Q.; HUSPI, S. H.; SOARES, C. G. Automatic identification system in accelerating decarbonization of maritime transportation: The state-of-the-art and opportunities. **Ocean Engineering**, v. 289, p. 116232, 2023.
- THOMÉ, A. M. T.; SCAVARDA, L. F.; SCAVARDA, A. J. Conducting systematic literature review in operations management. **Production Planning & Control**, v. 27, n. 5, p. 408-420, 2016.

TRANSPETRO. Navio da Transpetro recebe primeiro abastecimento de bunker com conteúdo renovável. **Transpetro**, 02 jan. 2023. Disponível em: <<https://transpetro.com.br/transpetro-institucional/noticias/navio-da-transpetro-recebe-primeiro-abastecimento-de-bunker-com-conteudo-renovavel.htm>>. Acesso em: 10 jul. 2023.

TRANSPETRO. Transpetro investe em eficiência energética e descarbonização da sua frota. **Transpetro**, 18 jan. 2024. Disponível em: <<https://transpetro.com.br/transpetro-institucional/noticias/transpetro-investe-em-eficiencia-energetica-e-descarbonizacao-da-sua-frota.htm>>. Acesso em: 26 jan. 2024.

TROMBETTA, G. L.; LEONARDI, S. G.; ALOISIO, D.; ANDALORO, L.; SERGI, F. Lithium-Ion Batteries on Board: A Review on Their Integration for Enabling the Energy Transition in Shipping Industry. **Energies**, v. 17, n. 5, p. 1-37, 2024.

TUSHMAN, M. L.; O'REILLY III, C. A. Ambidextrous organizations: Managing evolutionary and revolutionary change. **California management review**, v. 38, n. 4, p. 8-29, 1996.

TUSWAN, T.; MISBAHUDIN, S.; JUNIANTO, S.; YUDO, H.; SANTOSA, A. W. B.; TRIMULYONO, A. et al. Current research outlook on solar-assisted new energy ships: representative applications and fuel & GHG emission benefits. In : IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 1081, n. 1, p. 012011, IOP Publishing, 2022.

TUSWAN, T., SARI, D. P., MUTTAQIE, T., PRABOWO, A. R., SOETARDJO, M., MURWANTONO, T. T. P. et al. Representative application of LNG-fuelled ships: a critical overview on potential GHG emission reductions and economic benefits. **Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike**, v. 74, n. 1, p. 63-83, 2023.

UDOP. Com impulso de etanol de milho, Brasil pode manter exportações em 2024, diz Argus. União Nacional de Bioenergia (UDOP), 14 mar. 2024. Disponível em: <<https://www.udop.com.br/noticia/2024/03/14/com-impulso-de-etanol-de-milho-brasil-pode-manter-exportacoes-em-2024-diz-argus.html>>. Acesso em: 05 set. 2024.

UM. Shipping industry needs an alternative to fossil fuels, but which one?. **University of Manchester** (UM), 09 abr. 2018. Disponível em: <<https://www.manchester.ac.uk/discover/news/shipping-industry-needs-an-alternative-to-fossil-fuels-but-which-one/>>. Acesso em: 26 jan. 2024.

UNEP. Emissions Gap Report 2020. **United Nations Environment Programme (UNEP)**, 2020.

UNFCCC. Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement: First global stocktake. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), 13 dez. 2023. Disponível em: <[https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2023\\_L17\\_adv.pdf?download](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2023_L17_adv.pdf?download)>. Acesso em: 12 jan. 2024.

UNICA. Unica e ApexBrasil assinam acordo para promoção do etanol. União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia (UNICA), 01 dez. 2023. Disponível em: <<https://unica.com.br/noticias/unica-e-apexbrasil-assinam-acordo-para-promocao-do-etanol/>>. Acesso em: 10 de jan. de 2024.

UNICEF. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. *United Nations International Children's Emergency Fund* (UNICEF), 2024. Disponível em: <https://www.unicef.org/brazil/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel>. Acesso: 20 nov. 2023.

UNIGEL. Com investimento total de US\$ 1,5 bilhão, Bahia terá primeiro projeto de hidrogênio verde em escala industrial no Brasil. **Unigel**, 18 jan. 2023. Disponível em: <<https://www.unigel.com.br/com-investimento-total-de-us-15-bilhao-bahia-tera-primeiro-projeto-de-hidrogenio-verde-em-escala-industrial-no-brasil/>>. Acesso em: 25 de out. de 2023.

UNITED NATIONS. Acordo de Paris sobre o clima. United Nations, 11 dez. 2015a. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/88191-acordo-de-paris-sobre-o-clima>>. Acesso em: 15 jul. 2023.

UNITED NATIONS. Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. United Nations, 15 set. 2015b. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel>>. Acesso em: 20 jul. 2023.

UNITED NATIONS. What is climate change?. United Nations, 2024. Disponível em: <<https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change>>. Acesso em: 23 ago. 2023.

UOL. Uruguai quer se tornar um 'player' no mercado de hidrogênio verde. **UOL**, 18 jul. 2023. Disponível em: <<https://noticias.uol.com.br/ultimas-noticias/afp/2023/07/18/uruguai-quer-se-tornar-um-player-no-mercado-de-hidrogenio-verde.htm?cmpid=copiaecola>>. Acesso em: 29 jan. 2024.

USN. Department of the Navy. Climate Action 2030. United States Navy (USN), 2022.

VAIDYA, O. S.; KUMAR, S. Analytic hierarchy process: An overview of applications. **European Journal of operational research**, v. 169, n. 1, p. 1-29, 2006.

VAN HOECKE, L.; LAFFINEUR, L.; CAMPE, R.; PERREAULT, P.; VERBRUGGEN, S. W.; LENAERTS, S. Challenges in the use of hydrogen for maritime applications. **Energy & Environmental Science**, v. 14, n. 2, p. 815-843, 2021.

VOCES, D. Trade and Development Board High Level Segment - Decarbonization opportunities and challenges in the Blue Economy. **United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD)**, 19 jun. 2023. Disponível em: <<https://unctad.org/system/files/non-official-document/tdb70-EUROPECHE-voces-1.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2023.

VOSS, C. Case research in operations management. In : *Researching operations management* (pp. 176-209). Routledge, 2010.

WALKER, T. R.; ADEBAMBO, O.; FEIJOO, M. C. D. A.; ELHAIMER, E.; HOSSAIN, T.; EDWARDS, S. J. et al. Environmental effects of marine transportation. In : World seas: an environmental evaluation (pp. 505-530). Academic Press, 2019.

WANG, K.; WANG, J.; HUANG, L.; YUAN, Y.; WU, G.; XING, H. et al. A comprehensive review on the prediction of ship energy consumption and pollution gas emissions. **Ocean Engineering**, v. 266, p. 112826, 2022.

WANG, Y.; CAO, Q.; LIU, L.; WU, Y.; LIU, H.; GU, Z.; ZHU, C. A review of low and zero carbon fuel technologies: Achieving ship carbon reduction targets. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 54, p. 102762, 2022.

WANG, T.; CHENG, P.; ZHEN, L. Green development of the maritime industry: Overview, perspectives, and future research opportunities. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 179, p. 103322, 2023.

WANG, Z.; DONG, B.; LI, M.; JI, Y.; HAN, F. Configuration of Low-Carbon fuels green marine power systems in diverse ship types and Applications. **Energy Conversion and Management**, v. 302, p. 118139, 2024.

WÄRTSILÄ. Wärtsilä and Eidesvik Offshore to cooperate in world's first ammonia conversion project. **Wärtsilä**, 08 out. 2021. Disponível em: <<https://www.wartsila.com/media/news/08-10-2021-wartsila-and-eidesvik-offshore-to-cooperate-in-world-s-first-ammonia-conversion-project-2987432>>. Acesso em: 21 de jan. de 2024.

WÄRTSILÄ. Easing LPG's path towards acceptance as a viable marine fuel. **Wärtsilä**, 23 mai. 2022. Disponível em: <<https://www.wartsila.com/insights/article/easing-lpg-s-path-towards-acceptance-as-a-viable-marine-fuel>>. Acesso em: 10 abr. 2024.

WÄRTSILÄ. Wärtsilä launches world-first radical derating solution for two-stroke engines. **Wärtsilä**, 30 mar. 2023a. Disponível em: <<https://www.wartsila.com/media/news/30-03-2023-wartsila-launches-world-first-radical-derating-solution-for-two-stroke-engines-3248629>>. Acesso em: 15 abr. 2024.

WÄRTSILÄ. Wärtsilä Decarbonisation Modelling agreement supports Raízen's commitment to reducing marine sector's GHG emissions. **Wärtsilä**, 23 out. 2023b. Disponível em: <<https://www.wartsila.com/media/news/23-10-2023-wartsila-decarbonisation-modelling-agreement-supports-ra%C3%ADzen-s-commitment-to-reducing-marine-sector-s-ghg-emissions-3342427>>. Acesso em: 02 abr. 2024.

WÄRTSILÄ. Dual fuel engines. **Wärtsilä**, 2024a. Disponível em: <<https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/dual-fuel-engines>>. Acesso em: 20 mai. 2024.

WÄRTSILÄ. Methanol engines for ships of any size. **Wärtsilä**, 2024b. Disponível em: <<https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/methanol-engines>>. Acesso em: 10 mai. 2024.

WÄRTSILÄ. Future-proof Wärtsilä 25 engine to power three new fishing vessels. Wärtsilä, 8 mai. Wärtsilä, 2024c. Disponível em: <<https://www.wartsila.com/media/news/08-05-2024-future-proof-wartsila-25-engine-to-power-three-new-fishing-vessels-3441969>>. Acesso em: 21 mai. 2024.

WÄRTSILÄ. Wärtsilä 25 - the engine with true fuel flexibility. Wärtsilä, 2024d. Disponível em: <<https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/dual-fuel-engines/wartsila-25>>. Acesso em: 21 mai. 2024.

WÄRTSILÄ. Meet the world's first 4-stroke ammonia solution for marine. Wärtsilä, 2024e. Disponível em: <<https://www.wartsila.com/marine/wartsila-25-ammonia>>. Acesso em: 15 mar. 2024.

WÄRTSILÄ. An innovative and reliable system that enables the use of LPG as fuel. Wärtsilä, 2024f. Disponível em: <<https://www.wartsila.com/marine/products/gas-solutions/fuel-gas-solutions/wartsila-lpg-fuel-supply-system>>. Acesso em: 05 mai. 2024.

WEB OF SCIENCE. Scientific & Academic Research. Web of Science, 2024. Disponível em: <<https://clarivate.com/products/scientific-and-academic-research/research-discovery-and-workflow-solutions/webofscience-platform/#resources>>. Acesso em: 03 mai. 2023.

WEI, Huang Ken. Análise Comparativa do Porto ao Navio de Combustíveis Alternativos para Transporte Marítimo. **Universidade Federal do Rio de Janeiro**, 2021.

WHITE, R. Quão seguros são os navios de guerra movidos a energia nuclear dos EUA?. **Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)**, 18 mar. 2021. Disponível em: <[https://www.ipen.br/portal\\_por/portal/interna.php?secao\\_id=40&campo=15536](https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=40&campo=15536)>. Acesso em: 10 de abr. de 2024.

WILTGEN, G. NPa-500MB: Marinha e EMGEPRON assinam Acordo de Cooperação Técnica do Navio-Patrolha brasileiro. **Defesa Aérea e Naval**, 19 nov. 2023. Disponível em: <<https://www.defesaaereanaval.com.br/naval/npa-500mb-marinha-e-emgepron-assinam-acordo-de-cooperacao-tecnica-do-navio-patrolha-brasileiro>>. Acesso em: 10 dez. 2023.

WINNES, H.; STYHRE, L.; FRIDELL, E. Reducing GHG emissions from ships in port areas. *Research in **Transportation Business & Management***, v. 17, p. 73-82, 2015. Doi: <<https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2015.10.008>>.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Non Power Nuclear Applications: Nuclear-Powered Ships. **World Nuclear Association**, 15 fev. 2023. Disponível em: <<https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships>>. Acesso em: 15 de dez. de 2023.

YANG, W.; CHEN, X.; LIU, Y. Review and reflections of legislation and policies on shipping decarbonization under China's "dual carbon" target. **Frontiers in Marine Science**, 2023.

YANG, D. et al. Consequences analysis of the LPG tank truck traffic accident: A case study of the Wenling explosion accident. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 87, p. 105228, 2024.

YIN, R. K. **Case study research and applications**. 2018.

YIN, H.; YANG, M. S.; LAN, H.; HONG, Y. Y.; GUO, D.; JIN, F. A hybrid graph attention network based method for interval prediction of shipboard solar irradiation. **Energy**, v. 298, p. 131131, 2024.

ZARGHAMI, M.; SZIDAROVSKY, F. Introduction to multicriteria decision analysis. **In: Multicriteria Analysis: Applications to Water and Environment Management** (pp. 1-12), 2011.

ZHAO, J.; WEI, Q.; WANG, S.; REN, X. Progress of ship exhaust gas control technology. **Science of The Total Environment**, v. 799, p. 149437, 2021.

ZHU, Y.; ZHOU, W.; XIA, C.; HOU, Q. Application and Development of Selective Catalytic Reduction Technology for Marine Low-Speed Diesel Engine: Trade-Off among High Sulfur Fuel, High Thermal Efficiency, and Low Pollution Emission. **Atmosphere**, v. 13, n. 5, p. 731, 2022. Doi: <https://doi.org/10.3390/atmos13050731>.



## APÊNDICE A: MÉTODO AHP - TOPSIS

Os passos do método AHP-TOPSIS foram baseados em Cioca et al. (2021) e Ratnayake et al. (2022), e é composto de nove etapas principais. As primeiras 5 etapas são referentes ao método AHP, utilizado para peso dos critérios, e as 4 últimas ao método TOPSIS, utilizado para ranqueamento das soluções.

ETAPA 1- Matriz de comparação (A): Cada tomador de decisão utiliza do seu julgamento, através de uma escala, para realizar uma comparação entre pares, definindo prioridades e classificando as alternativas. Ao serem comparados, os critérios recebem um valor, baseado nessa escala, para cada decisor, e a comparação contrária recebe o valor de 1/peso, gerando uma matriz de comparação (A).

ETAPA 2- Normalização da matriz de comparação (A): A matriz de comparação (A) é normalizada, e é gerado o autovetor, ou vetor prioridade (w), que consiste na normalização da soma de cada linha da matriz normalizada.

ETAPA 3- Cálculo do autovalor ( $\lambda_{\max}$ ): O cálculo do autovalor máximo ( $\lambda_{\max}$ ), compõe uma das etapas para aplicação do teste de consistência verificação da consistência da opinião dos decisores. O cálculo consiste no somatório da multiplicação do vetor prioridade (w) pela matriz inicial (A), dividido pelo vetor prioridade (w), multiplicado por 1/n, sendo n a quantidade de critérios comparados. A fórmula pode ser observada na equação 1.

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{w_i} \quad (1)$$

ETAPA 4- Após o cálculo do  $\lambda_{\max}$ , é calculada o índice de consistência (CI). Ele é calculado como apresentado na equação 2.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

ETAPA 5- A taxa de consistência é obtida pela razão entre CI e o índice randômico (RI), obtido pela Tabela de Saaty (1980), observado na Tabela 23, de acordo com a quantidade de critérios (n). Caso o valor desta taxa seja menor que 0,1 do valor de RI para a quantidade analisada, o julgamento do decisor é considerado consistente e o vetor prioridade (w) pode ser utilizado como peso para os critérios.

Tabela 23: Índice médio de consistência randômico

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.4	1.45	1.49

ETAPA 6 - Construção da matriz de decisão, onde cada alternativa é avaliada em determinado critério e posteriormente normalizada, conforme fórmula da equação 3. O  $x_{ij}$  são os elementos da matriz de decisão,  $i$  é o número de linhas de 1 a m, e  $j$  o número de colunas de 1 a n, e  $r_{ij}$  os elementos da matriz de decisão normalizada.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m x_{ij}^2}} \quad (3)$$

ETAPA 7 - Nessa etapa é realizada a multiplicação dos pesos dos critérios ( $w$ ), obtidos pelo método AHP, pela matriz normalizada ( $r_{ij}$ ), obtendo a matriz normalizada ponderada ( $v_{ij}$ ).

ETAPA 8 - Na etapa 3 são calculadas a “solução ideal positiva” ou “*Positive Ideal Solution (PIS)*” e a “solução ideal negativa” ou “*Negative Ideal Solution (NIS)*”, conforme equação 4, onde  $J$  está ligado a critérios de benefício, ou seja, de vantagem, e  $J'$  está ligado a critérios de custo, ou desvantagem.

$$PIS = A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\}$$

$$NIS = A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}$$

onde:

$$v_j^+ = \max_i v_{ij} \text{ if } j \in J, v_j^+ = \min_i v_{ij} \text{ if } j \in J'$$

$$v_j^- = \min_i v_{ij} \text{ if } j \in J, v_j^- = \max_i v_{ij} \text{ if } j \in J'$$

(4)

ETAPA 9 - Nessa etapa é realizado o cálculo da distância de separação de cada alternativa competitiva da solução ideal e não ideal, conforme equação 5. Depois disso, deve-se calcular a “proximidade relativa da solução ideal” ( $C_i^*$ ), de acordo com a equação 6. A melhor alternativa é a que apresenta o maior valor de “proximidade relativa da solução ideal”.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad i = 1, \dots, m.$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad i = 1, \dots, m. \quad (5)$$

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}, C_i^* \in [0, 1], i = 1, \dots, m. \quad (6)$$

**APÊNDICE B: MATRIZES PAR A PAR PARA CRITÉRIOS DE PROPULSÃO E DE COMBUSTÍVEL**

<b>Critério Propulsão Especialista 1</b>	Custo do ciclo de vida	Potencial de redução de emissões	Ruído	Segurança	Espaço Utilizado/peso	Maturidade tecnológica	Aplicabilidade
Custo do ciclo de vida	1	5	3	1/3	7	3	7
Potencial de redução de emissões	1/5	1	1/3	1/9	3	1/5	3
Ruído	1/3	3	1	1/7	3	1/5	7
Segurança	3	9	7	1	7	7	9
Espaço Utilizado/peso	1/7	1/3	1/3	1/7	1	1/3	5
Maturidade tecnológica	1/3	5	5	1/7	3	1	7
Aplicabilidade	1/7	1/3	1/7	1/9	1/5	1/7	1

<b>Critério Propulsão Especialista 2</b>	Custo do ciclo de vida	Potencial de redução de emissões	Ruído	Segurança	Espaço Utilizado/peso	Maturidade tecnológica	Aplicabilidade
Custo do ciclo de vida	1	1/3	3	1/5	1/7	1/7	1/9
Potencial de redução de emissões	3	1	5	1/3	1/5	1/5	1/7
Ruído	1/3	1/5	1	1/5	1/7	1/9	1/9
Segurança	5	3	5	1	1/3	1/5	1/5
Espaço Utilizado/peso	7	5	7	3	1	1/3	1/5
Maturidade tecnológica	7	5	9	5	3	1	1/3
Aplicabilidade	9	7	9	5	5	3	1

<b>Critério Combustível Especialista 1</b>	Disponibilidade	Maturidade tecnológica	Espaço de Armazenagem/densidade	Custos gerais	Segurança	Sustentabilidade geral e emissões	Flexibilidade
Disponibilidade	1	1/7	1/3	3	1/5	5	5
Maturidade tecnológica	5	1	3	5	1/3	7	9
Espaço de Armazenagem/densidade	3	1/3	1	3	1/3	5	7
Custos gerais	1/3	1/5	1/3	1	1/5	3	5
Segurança	5	3	3	5	1	9	9
Sustentabilidade geral e emissões	1/3	1/7	1/5	1/3	1/7	1	3
Flexibilidade	1/5	1/7	1/7	1/5	1/9	1/3	1

<b>Critério Combustível Especialista 2</b>	Disponibilidade	Maturidade tecnológica	Espaço de Armazenagem/densidade	Custos gerais	Segurança	Sustentabilidade geral e emissões	Flexibilidade
Disponibilidade	1	3	1/3	1/5	5	1/5	5
Maturidade tecnológica	1/3	1	1/5	1/7	3	1/7	5
Espaço de Armazenagem/densidade	3	5	1	1/5	5	1/3	7
Custos gerais	5	7	3	1	7	1/3	7
Segurança	1/5	1/3	1/5	1/7	1	1/7	3
Sustentabilidade geral e emissões	5	7	3	3	7	1	9
Flexibilidade	1/5	1/5	1/7	1/7	1/3	1/9	1

## APÊNDICE C: CÓDIGOS *RSTUDIO* PARA PESO DOS CRITÉRIOS

```
library(xlsx)
library(xlsxjars)
library(rJava)
library(readxl)
```

```
# AHP -CRITÉRIOS PROPULSÃO
```

```
# AHPCRITERIOSFINAL.xlsx = Planilha contendo a representação das matrizes par
```

```
# a par.
```

```
# Na linha 1:2, aba 2, está a representação da matriz referente à propulsão
```

```
# (linha 1 especialista 1 e linha 2 especialista 2)
```

```
data_1<-read.xlsx("AHPCRITERIOSFINAL.xlsx",2,header=TRUE)
```

```
CUSTO_POTRED = as.numeric(data_1[1:2,1])
```

```
CUSTO_RUI= as.numeric(data_1[1:2,2])
```

```
CUSTO_SEG = as.numeric(data_1[1:2,3])
```

```
CUSTO_ESP = as.numeric(data_1[1:2,4])
```

```
CUSTO_MAT = as.numeric(data_1[1:2,5])
```

```
CUSTO_APL = as.numeric(data_1[1:2,6])
```

```
POTRED_RUI = as.numeric(data_1[1:2,7])
```

```
POTRED_SEG = as.numeric(data_1[1:2,8])
```

```
POTRED_ESP = as.numeric(data_1[1:2,9])
```

```
POTRED_MAT = as.numeric(data_1[1:2,10])
```

```
POTRED_APL = as.numeric(data_1[1:2,11])
```

```
RUI_SEG = as.numeric(data_1[1:2,12])
```

```
RUI_ESP = as.numeric(data_1[1:2,13])
```

```
RUI_MAT = as.numeric(data_1[1:2,14])
```

```
RUI_APL = as.numeric(data_1[1:2,15])
```

```
SEG_ESP = as.numeric(data_1[1:2,16])
```

```
SEG_MAT = as.numeric(data_1[1:2,17])
```

```
SEG_APL = as.numeric(data_1[1:2,18])
```

```
ESP_MAT = as.numeric(data_1[1:2,19])
```

```
ESP_APL = as.numeric(data_1[1:2,20])
```

```
MAT_APL = as.numeric(data_1[1:2,21])
```

```
Data_AHP1<-
```

```
data.frame(CUSTO_POTRED,CUSTO_RUI,CUSTO_SEG,CUSTO_ESP,CUSTO_MAT,
```

```
          CUSTO_APL,POTRED_RUI,POTRED_SEG,POTRED_ESP,POTRED_MAT,
```

```
          POTRED_APL,RUI_SEG,
          RUI_ESP,RUI_MAT,RUI_APL,SEG_ESP,SEG_MAT,SEG_APL,ESP_MAT,
          ESP_APL,MAT_APL)
```

```
library(ahpsurvey)
```

```
library(magrittr)
```

```
atts1<- c('Custo Geral','Potencial de Redução de Emissões', 'Ruído',
          'Segurança','Espaço Utilizado/Peso','Maturidade Tecnológica',
          'Aplicabilidade')
```

```
matrix_ahp1 <-ahp.mat(df=Data_AHP1,atts=atts1,reciprocal=FALSE)
matrix_ahp1
```

```
priority_eigen1=ahp.indpref(matrix_ahp1,atts1, method ="eigen")
CR1= ahp.cr(matrix_ahp1,atts1)
CR1
```

```
#Resultado CR1: Especialista 1: 0.12982030 Especialista 2: 0.09105351
```

```
# AHP - Média geométrica opinião especialistas para propulsão
```

```
AIJ1=ahp.aggjudge(matrix_ahp1,atts1,aggmethod = 'geometric')
AIJ1=data.frame(AIJ1)
```

```
df_AIJ1= data.frame(AIJ1[1,2],AIJ1[1,3],AIJ1[1,4],AIJ1[1,5],AIJ1[1,6],
                    AIJ1[1,7],AIJ1[2,3],AIJ1[2,4],AIJ1[2,5],AIJ1[2,6],
                    AIJ1[2,7],
                    AIJ1[3,4],AIJ1[3,5],AIJ1[3,6],AIJ1[3,7],AIJ1[4,5],
                    AIJ1[4,6],
                    AIJ1[4,7],
                    AIJ1[5,6],AIJ1[5,7],AIJ1[6,7])
```

```
matrix_AIJ1<-ahp.mat(df=df_AIJ1,atts = atts1, reciprocal=FALSE)
priority_eigen_AIJ1=ahp.indpref(matrix_AIJ1,atts1, method ="eigen")
CRAIJ1=ahp.cr(matrix_AIJ1,atts1)
```

```
# Valor priority_eigen_AIJ1 (vetor de peso para critérios propulsão média
#geométrica)=
```

```
#Custo Geral Potencial de Redução de Emissões Ruído Segurança
# 0.1121611 0.07059416 0.05564707 0.2776146
```

```
# Espaço Utilizado/Peso Maturidade Tecnológica Aplicabilidade
# 0.1066151 0.2579944 0.1193735
```

```
# Resultado CRAIJ1= 0.04162598
```

```
# AHPCRITERIOSFINAL.xlsx = Planilha contendo a representação das
matrizes par a
```

```
# par.
```

```
# Na linha 1:2, aba 3, está a representação da matriz referente à combustível
```

```
# (linha 1 especialista 1 e linha 2 especialista 2)
```

```
# AHP -CRITÉRIOS COMBUSTÍVEL
```

```
data_2<-read.xlsx("AHPCRITERIOSFINAL.xlsx",3,header=TRUE)
```

```
DIS_MATT = as.numeric(data_2[1:2,1])
```

```
DIS_ESPDEN= as.numeric(data_2[1:2,2])
```

```
DIS_CUST = as.numeric(data_2[1:2,3])
```

```
DIS_SEGU = as.numeric(data_2[1:2,4])
```

```
DIS_SUST = as.numeric(data_2[1:2,5])
```

```
DISP_FLEX = as.numeric(data_2[1:2,6])
```

```
MATT_ESPDEN = as.numeric(data_2[1:2,7])
```

```
MATT_CUST = as.numeric(data_2[1:2,8])
```

```
MATT_SEGU = as.numeric(data_2[1:2,9])
```

```
MATT_SUST = as.numeric(data_2[1:2,10])
```

```
MATT_FLEX = as.numeric(data_2[1:2,11])
```

```

ESPEN_CUST = as.numeric(data_2[1:2,12])
ESPEN_SEGU = as.numeric(data_2[1:2,13])
ESPEN_SUST = as.numeric(data_2[1:2,14])
ESPEN_FLEX = as.numeric(data_2[1:2,15])
CUST_SEGU = as.numeric(data_2[1:2,16])
CUST_SUST = as.numeric(data_2[1:2,17])
CUST_FLEX = as.numeric(data_2[1:2,18])
SEGU_SUST = as.numeric(data_2[1:2,19])
SEGU_FLEX = as.numeric(data_2[1:2,20])
SUST_FLEX = as.numeric(data_2[1:2,21])

```

```

Data_AHP2<-
data.frame(DIS_MATT,DIS_ESPEN,DIS_CUST,DIS_SEGU,DIS_SUST,
DISP_FLEX,MATT_ESPEN,MATT_CUST,MATT_SEGU,MATT_SUST,
MATT_FLEX,ESPEN_CUST,ESPEN_SEGU,ESPEN_SUST,
ESPEN_FLEX,
CUST_SEGU,CUST_SUST,CUST_FLEX,SEGU_SUST,SEGU_FLEX,
SUST_FLEX)
library(ahpsurvey)
library(magrittr)

atts2<- c('Disponibilidade','Maturidade Tecnológica',
'Espaço de Armazenagem/Densidade',
'Custos Gerais','Segurança','Sustentabilidade/Redução de Emissões',
'Flexibilidade')
matrix_ahp2 <-ahp.mat(df=Data_AHP2,atts=atts2,reciprocal=FALSE)
matrix_ahp2

priority_eigen2=ahp.indpref(matrix_ahp2,atts2, method ="eigen")
CR2= ahp.cr(matrix_ahp2,atts2)
CR2

#Resultado CR2: Especialista 1: 0.08489548 Especialista 2: 0.10799874

# AHP - GDM- AIJ - COMBUSTÍVEL

AIJ2=ahp.aggjudge(matrix_ahp2,atts2,aggmethod = 'geometric')
AIJ2=data.frame(AIJ2)

df_AIJ2= data.frame(AIJ2[1,2],AIJ2[1,3],AIJ2[1,4],AIJ2[1,5],
AIJ2[1,6],AIJ2[1,7],
AIJ2[2,3],AIJ2[2,4],AIJ2[2,5],AIJ2[2,6],
AIJ2[2,7],AIJ2[3,4],
AIJ2[3,5],AIJ2[3,6],AIJ2[3,7],
AIJ2[4,5],AIJ2[4,6],AIJ2[4,7],
AIJ2[5,6],AIJ2[5,7],AIJ2[6,7])
matrix_AIJ2<-ahp.mat(df=df_AIJ2,atts = atts2, reciprocal=FALSE)
priority_eigen_AIJ2=ahp.indpref(matrix_AIJ2,atts2, method ="eigen")
CRAIJ2=ahp.cr(matrix_AIJ2,atts2)

# Valor priority_eigen_AIJ2 (vetor de peso para critérios combustível média
#geométrica)=

```

#Disponibilidade	Maturidade	Tecnológica	Espaço	de
Armazenagem/Densidade				
# 0.1226618	0.161059	0.2112315		
# Custos Gerais	Segurança	Sustentabilidade/Redução de Emissões		
Flexibilidade				
# 0.1812284	0.1489369	0.1476295	0.02725287	
#Resultado CRAIJ2= 0.01325513				



## APÊNDICE D: MATRIZES DE JULGAMENTO DE SP EM CADA CRITÉRIO E CÓDIGO RSTUDIO PARA MÉTODO TOPSIS PARA SP

Especialista 1		Custo do Ciclo de Vida	Potencial de redução de emissões	Ruído	Segurança	Espaço Utilizado/peso	Maturidade tecnológica	Aplicabilidade
	<b>Mecânica</b>							
SP1	ICE	4	1	1	3	3	5	5
	<b>Elétrica</b>							
SP2	Bateria (BESS) com ou sem supercapacitor	3	5	5	4	2	4	4
SP3	Células de combustível + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	2	5	5	3	3	3	2
SP4	Energia eólica + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	3	5	3	5	1	2	2
SP5	Energia solar + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	3	5	5	5	1	2	2
SP6	Energia eólica + energia solar + bateria(BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	3	5	4	5	1	2	3
SP7	Células de combustível + Energia eólica e/ou solar + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	2	5	4	4	2	2	5
SP8	Energia nuclear	1	4	4	2	4	4	5
	<b>Híbrida</b>							
SP9	ICE + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor	4	2	3	3	3	4	5
SP10	ICE + célula de combustível + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor	3	3	3	3	2	3	4
SP11	ICE + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor + energia solar	4	3	3	4	2	3	3
SP12	ICE + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor + energia eólica	3	3	3	4	2	3	3
SP13	ICE + célula de combustível + bateria(BESS) com ou sem supercapacitor + energia eolica e/ou solar	3	4	4	4	2	2	3

Especialista 2		Custo do Ciclo de Vida	Potencial de redução de emissões	Ruído	Segurança	Espaço Utilizado/peso	Maturidade tecnológica	Aplicabilidade
	<b>Mecânica</b>							
SP1	ICE	3	1	2	3	4	4	5
	<b>Elétrica</b>							
SP2	Bateria (BESS) com ou sem supercapacitor	1	3	4	2	3	3	3
SP3	Células de combustível + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	2	4	4	3	3	2	3
SP4	Energia eólica + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	3	4	4	4	1	2	1
SP5	Energia solar + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	2	4	5	4	1	1	2
SP6	Energia eólica + energia solar + bateria(BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	1	4	4	5	1	1	1
SP7	Células de combustível + Energia eólica e/ou solar + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	2	5	5	3	2	1	1
SP8	Energia nuclear	1	5	5	4	2	3	1
	<b>Híbrida</b>							
SP9	ICE + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor	2	3	5	4	1	2	4
SP10	ICE + célula de combustível + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor	1	5	3	4	2	2	2
SP11	ICE + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor + energia solar	2	4	4	4	2	1	1
SP12	ICE + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor + energia eólica	3	3	3	4	1	2	1
SP13	ICE + célula de combustível + bateria(BESS) com ou sem supercapacitor + energia eolica e/ou solar	1	4	3	4	1	1	1

Especialista 3		Custo do Ciclo de Vida	Potencial de redução de emissões	Ruído	Segurança	Espaço Utilizado/peso	Maturidade tecnológica	Aplicabilidade
	<b>Mecânica</b>							
SP1	ICE	5	3	3	5	5	5	5
	<b>Elétrica</b>							
SP2	Bateria (BESS) com ou sem supercapacitor	3	5	5	3	3	5	3
SP3	Células de combustível + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	2	5	5	2	2	2	4
SP4	Energia eólica + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	2	5	5	3	1	4	1
SP5	Energia solar + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	3	5	5	3	1	4	1
SP6	Energia eólica + energia solar + bateria(BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	2	5	5	3	1	4	1
SP7	Células de combustível + Energia eólica e/ou solar + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	1	5	5	2	1	2	1
SP8	Energia nuclear	1	5	2	1	1	4	2
	<b>Híbrida</b>							
SP9	ICE + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor	3	4	3	5	3	5	5
SP10	ICE + célula de combustível + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor	2	4	3	2	3	2	1
SP11	ICE + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor + energia solar	4	4	3	4	1	4	1
SP12	ICE + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor + energia eólica	3	4	3	3	1	4	1
SP13	ICE + célula de combustível + bateria(BESS) com ou sem supercapacitor + energia eolica e/ou solar	2	3	3	2	1	2	1

Especialista 4		Custo do Ciclo de Vida	Potencial de redução de emissões	Ruído	Segurança	Espaço Utilizado/peso	Maturidade tecnológica	Aplicabilidade
	<b>Mecânica</b>							
SP1	ICE	5	3	1	4	5	5	5
	<b>Elétrica</b>							
SP2	Bateria (BESS) com ou sem supercapacitor	3	5	5	4	2	5	3
SP3	Células de combustível + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	2	5	5	2	3	2	3
SP4	Energia eólica + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	2	5	5	3	1	4	1
SP5	Energia solar + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	3	5	5	4	1	4	1
SP6	Energia eólica + energia solar + bateria(BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	2	5	5	3	1	4	1
SP7	Células de combustível + Energia eólica e/ou solar + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor (EES)	1	5	5	2	1	2	1
SP8	Energia nuclear	1	5	5	1	3	3	2
	<b>Híbrida</b>							
SP9	ICE + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor	3	4	3	4	2	5	5
SP10	ICE + célula de combustível + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor	2	4	3	2	3	2	1
SP11	ICE + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor + energia solar	4	4	3	4	1	4	1
SP12	ICE + bateria (BESS) com ou sem supercapacitor + energia eólica	3	4	3	3	1	4	1
SP13	ICE + célula de combustível + bateria(BESS) com ou sem supercapacitor + energia eólica e/ou solar	2	4	3	2	2	2	1

```

install.packages('RankAggreg')
install.packages("topsis")
library(RankAggreg)
library(MCDM)
#TOPSIS SOLUÇÃO DE PROPULSÃO
# MATRIZ ESPECIALISTA 1
a1<- matrix(c(4,3,2,3,3,3,2,1,4,3,4,3,3,1,5,5,5,5,5,4,2,3,3,3,4,
              1,5,5,3,5,4,4,4,3,3,3,3,4,3,4,3,5,5,5,4,2,3,3,4,4,4,
              3,2,3,1,1,1,2,4,3,2,2,2,2,5,4,3,2,2,2,2,4,4,3,3,3,2,
              5,4,2,2,2,3,5,5,5,4,3,3,3), nrow=13, ncol=7)

# MATRIZ ESPECIALISTA 2
a2<- matrix(c(3,1,2,3,2,1,2,1,2,1,2,3,1,1,3,4,4,4,4,5,5,3,5,4,3,4,
              2,4,4,4,5,4,5,5,5,3,4,3,3,3,2,3,4,4,5,3,4,4,4,4,4,4,
              4,3,3,1,1,1,2,2,1,2,2,1,1,4,3,2,2,1,1,1,3,2,2,1,2,1,
              5,3,3,1,2,1,1,1,4,2,1,1,1), nrow=13, ncol=7)

# MATRIZ ESPECIALISTA 3
a3<- matrix(c(5,3,2,2,3,2,1,1,3,2,4,3,2,3,5,5,5,5,5,5,4,4,4,4,3,
              3,5,5,5,5,5,2,3,3,3,3,3,5,3,2,3,3,3,2,1,5,2,4,3,2,
              5,3,2,1,1,1,1,1,3,3,1,1,1,5,2,4,4,4,2,4,5,2,4,4,2,
              5,3,4,1,1,1,1,2,5,1,1,1,1), nrow=13, ncol=7)

# MATRIZ ESPECIALISTA 4
a4<- matrix(c(5,3,2,2,3,2,1,1,3,2,4,3,2,3,5,5,5,5,5,5,4,4,4,4,4,
              1,5,5,5,5,5,5,3,3,3,3,3,4,4,2,3,4,3,2,1,4,2,4,3,2,
              5,2,3,1,1,1,1,3,2,3,1,1,2,5,5,2,4,4,4,2,3,5,2,4,4,2,
              5,3,3,1,1,1,1,2,5,1,1,1,1), nrow=13, ncol=7)
# Média aritmética das matrizes a1, a2, a3 e a4
som_matrix_prop <- a1 + a2 + a3 + a4
a_propulsao<- som_matrix_prop / 4
# Peso dos critérios de propulsão
wprop<- c(0.11, 0.07, 0.05, 0.28, 0.11, 0.26, 0.12)
# Todos os critérios são de benefício
cb_prop<- c('max','max','max','max','max','max','max')
# Função para gerar ranking final
TOPSISVector(a_propulsao,wprop,cb_prop)
    
```

**APÊNDICE E: MATRIZES DE JULGAMENTO DE SC\_ICE EM CADA CRITÉRIO E CÓDIGO RSTUDIO PARA MÉTODO TOPSIS PARA SC\_ICE**

Especialista 1	Disponibilidade	Maturidade tecnológica	Espaço de Armazenagem/densidade	Custos gerais	Segurança	Sustentabilidade geral e emissões	Flexibilidade
Biocombustível <i>drop-in</i>	3	4	4	3	4	4	4
Bio-etanol	4	5	3	3	4	4	3
LNG	5	5	3	4	3	3	4
Bio-LNG	3	4	3	3	4	5	4
LPG	5	5	4	4	3	3	4
Bio-LPG	3	4	4	3	4	5	4
Amônia verde	2	3	2	3	2	5	3
Hidrogênio verde	2	3	1	2	2	5	3
Biometanol	3	4	3	3	4	4	4
Eletrometanol	2	3	3	3	4	5	3
Eletrometano	2	3	3	3	4	5	3
Eletrodiesel	2	3	3	3	4	5	3

Especialista 2	Disponibilidade	Maturidade tecnológica	Espaço de Armazenagem/densidade	Custos gerais	Segurança	Sustentabilidade geral e emissões	Flexibilidade
Biocombustível <i>drop-in</i>	5	5	4	4	3	2	3
Bio-etanol	2	2	4	3	4	4	3
LNG	3	2	1	3	2	2	3
Bio-LNG	2	2	1	2	2	4	2
LPG	3	2	1	3	3	3	3
Bio-LPG	2	2	1	3	3	4	2
Amônia verde	2	2	1	3	2	4	2
Hidrogênio verde	2	1	1	2	1	5	3
Biometanol	3	3	4	3	2	3	3
Eletrometanol	2	2	4	3	2	4	3
Eletrometano	2	2	3	4	1	4	3
Eletrodiesel	3	3	4	3	3	4	4

Especialista 3	Disponibilidade	Maturidade tecnológica	Espaço de Armazenagem/densidade	Custos gerais	Segurança	Sustentabilidade geral e emissões	Flexibilidade
Biocombustível <i>drop-in</i>	3	4	5	3	5	3	3
Bio-etanol	4	2	4	3	4	3	3
LNG	4	5	4	4	3	1	5
Bio-LNG	2	4	4	3	3	3	5
LPG	4	4	5	4	4	1	5
Bio-LPG	2	3	5	3	4	3	5
Amônia verde	2	3	2	2	2	5	4
Hidrogênio verde	2	2	1	1	2	5	3
Biometanol	4	5	3	5	3	4	5
Eletrometanol	1	2	3	1	3	4	5
Eletrometano	1	2	4	1	3	4	5
Eletrodiesel	1	3	5	1	5	5	3



Especialista 4	Disponibilidade	Maturidade tecnológica	Espaço de Armazenagem/densidade	Custos gerais	Segurança	Sustentabilidade geral e emissões	Flexibilidade
Biocombustível <i>drop-in</i>	3	4	5	3	5	3	3
Bio-etanol	4	2	4	3	4	3	3
LNG	4	5	3	4	3	1	5
Bio-LNG	2	4	3	3	3	3	5
LPG	4	4	4	4	4	1	5
Bio-LPG	2	3	4	3	4	3	5
Amônia verde	2	3	2	2	2	5	4
Hidrogênio verde	2	2	1	1	2	5	3
Biometanol	4	5	4	5	3	4	5
Eletrometanol	1	2	4	1	3	4	5
Eletrometano	1	2	4	1	3	4	5
Eletrodiesel	1	3	5	1	5	5	3

```
#TOPSIS COMBUSTÍVEL ICE
# MATRIZ ESPECIALISTA 1
b1<- matrix(c(3,4,5,3,5,3,2,2,3,2,2,2,4,5,5,4,5,4,3,3,4,3,3,3,
4,3,3,3,4,4,2,1,3,3,3,3,3,3,4,3,4,3,3,2,3,3,3,3,
4,4,3,4,3,4,2,2,4,4,4,4,4,4,3,5,3,5,5,5,4,5,5,5,
4,3,4,4,4,4,3,3,4,3,3,3), nrow=12, ncol=7)

# MATRIZ ESPECIALISTA 2
b2<- matrix(c(5,2,3,2,3,2,2,2,3,2,2,3,5,2,2,2,2,2,1,3,2,2,3,
4,4,1,1,1,1,1,1,4,4,3,4,4,3,3,2,3,3,3,2,3,3,4,3,
3,4,2,2,3,3,2,1,2,2,1,3,2,4,2,4,3,4,4,5,3,4,4,4,
3,3,3,2,3,2,2,3,3,3,4), nrow=12, ncol=7)

# MATRIZ ESPECIALISTA 3
b3<- matrix(c(3,4,4,2,4,2,2,2,4,1,1,1,4,2,5,4,4,3,3,2,5,2,2,3,
5,4,4,4,5,5,2,1,3,3,4,5,3,3,4,3,4,3,2,1,5,1,1,1,
5,4,3,3,4,4,2,2,3,3,3,5,3,3,1,3,1,3,5,5,4,4,4,5,
3,3,5,5,5,5,4,3,5,5,5,3), nrow=12, ncol=7)

# MATRIZ ESPECIALISTA 4
b4<- matrix(c(3,4,4,2,4,2,2,2,4,1,1,1,4,2,5,4,4,3,3,2,5,2,2,3,
5,4,3,3,4,4,2,1,4,4,4,5,3,3,4,3,4,3,2,1,5,1,1,1,
5,4,3,3,4,4,2,2,3,3,3,5,3,3,1,3,1,3,5,5,4,4,4,5,
3,3,5,5,5,5,4,3,5,5,5,3), nrow=12, ncol=7)

# Média aritmética das matrizes a1, a2, a3 e a4
som_matrix_comb <- b1 + b2 + b3 + b4
a_combustivel<- som_matrix_comb / 4

# Peso dos critérios de combustível
wcomb<-c(0.12, 0.16, 0.21, 0.18, 0.15, 0.15, 0.03)
# Todos os critérios são de benefício
cb_comb<- c('max','max','max','max','max','max','max')
# Função para gerar ranking final
TOPSISVector(a_combustivel,wcomb,cb_comb)
```

## APÊNDICE F: TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (TCLE)

Gostaríamos de utilizar informações obtidas nesta entrevista em relatório e publicação acadêmica, respeitando a confidencialidade do entrevistado.

Na figura de participante deste estudo e membro da empresa em que trabalho, eu declaro que:

1. Eu fui informado que minha decisão em fazer parte deste estudo é voluntária e que posso me recusar a participar ou sair deste estudo em qualquer momento anterior a 15 de junho de 2024.

2. Eu tive a chance de solicitar todas as informações que gostaria a respeito deste estudo e todas as minhas dúvidas foram esclarecidas.

3. Eu entendo que as informações fornecidas por mim através de entrevista e de documentos que disponibilizei serão acessadas pela equipe de pesquisa deste estudo.

4. Eu entendo que uma cópia deste Formulário de Consentimento será entregue a mim após assinado.

5. Eu li todas as considerações deste Formulário de Consentimento.

6. Eu concordo em participar deste estudo.

7. Minha opinião é meramente para fins acadêmicos, baseada na minha experiência profissional e não representa a posição oficial da empresa sobre o tema.

Por fim, declaro que (Marque “sim” ou “não” para as seguintes afirmações):

As informações obtidas nesta entrevista podem ser publicadas sob as seguintes condições:

SIM  NÃO

Concordo em ter informações desta entrevista publicadas se eu (pessoa física) permanecer anônimo (ou seja, meu nome não seja divulgado).

SIM  NÃO

Concordo com a publicação das informações desta entrevista, com minha associação à empresa divulgada.

\_\_\_\_\_, \_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

Nome da Empresa:

Nome do Entrevistado:

Assinatura do Entrevistado: \_\_\_\_\_