



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

FELLYPE FERREIRA TEIXEIRA DA SILVA

BIOCOMBUSTÍVEIS NO SETOR MARÍTIMO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

PAU DOS FERROS – RN
2025

FELLYPE FERREIRA TEIXEIRA DA SILVA

BIOCOMBUSTÍVEIS NO SETOR MARÍTIMO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientadora: Aline Mara Maia Bessa Prof. Dra.

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S586b Silva, Fellype Ferreira Teixeira da .
Biocombustíveis no setor marítimo: uma revisão
bibliográfica / Fellype Ferreira Teixeira da
Silva. - 2025.
72 f. : il.

Orientador: Aline Mara Maia Bessa .
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2025.

1. Biocombustíveis. 2. Transporte marítimo. 3.
Descarbonização. 4. Energia renovável. 5. Brasil.
I. Bessa , Aline Mara Maia , orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo) autor(a).

Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

FELLYPE FERREIRA TEIXEIRA DA SILVA

BIOCOMBUSTÍVEIS NO SETOR MARÍTIMO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 17/12/ 2025

BANCA EXAMINADORA

Aline Mara Maia Bessa, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Kytéria Sabina Lopes de Figueredo, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

José Mariano da Silva Neto, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, pela saúde e pela oportunidade de chegar até este momento tão significativo em minha trajetória. Sem sua presença, nada disso teria sido possível.

Aos meus pais, que sempre foram minha base e meu porto seguro. Ao meu pai, Francisco Clezimar, por me ensinar a importância do trabalho, da persistência e da honestidade, valores que carrego comigo em todas as escolhas da vida. À minha mãe, Luciana Ferreira, por todo o carinho, cuidado, palavras de incentivo e pelo amor incondicional que sempre me fortaleceu nos momentos mais difíceis. Vocês são a razão da minha dedicação e determinação.

Ao meu irmão, Matheus Ferreira, companheiro de tantas conversas e momentos de descontração, que, com sua forma única de enxergar a vida, me ajudou a encontrar leveza mesmo nos dias mais pesados. Obrigado por estar sempre ao meu lado, compartilhando não apenas o vínculo de sangue, mas também a amizade verdadeira que construímos.

À minha namorada, Élica Benigna, minha companheira de todas as horas, minha fortaleza e minha inspiração. Foram muitos os momentos em que pensei em desistir, em que o peso da caminhada parecia maior do que minhas forças, mas foi o seu olhar, sua palavra de incentivo e seu abraço que me fizeram seguir em frente. Obrigado por compreender minhas ausências, por me apoiar nos dias de cansaço e por dividir comigo não apenas os sorrisos, mas também as preocupações e incertezas. Você esteve ao meu lado em cada etapa, acreditando em mim quando eu mesmo duvidava, e isso é algo que nunca esquecerei. Este trabalho também é seu, pois cada página carrega um pouco da sua paciência, do seu carinho e da sua fé no meu potencial.

À minha querida avó, Francinete Rita (Celina), que já não está mais entre nós, mas que segue viva em minhas lembranças e no meu coração. Nunca vou esquecer o dia em que a senhora disse que a próxima formatura que iria seria a minha. Hoje, não está presente de forma física, mas sei que está comigo em cada passo, em cada conquista, em cada vitória. Este trabalho é também uma forma de honrar sua memória, seu amor e seus ensinamentos, que permanecem como guia na minha vida. Obrigado, minha querida Celina.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão à minha orientadora, Aline Mara Maia Bessa, Prof. Dra., pelo apoio incondicional, pela paciência, pela orientação precisa e pela dedicação ao longo de toda a elaboração deste trabalho. Sua visão crítica e comprometimento foram fundamentais para o desenvolvimento deste TCC. Suas palavras de incentivo e confiança

em meu trabalho me motivaram a buscar sempre o melhor. Agradeço profundamente pela generosidade em compartilhar seu conhecimento e por ter me guiado com tanto cuidado e atenção em cada etapa deste processo acadêmico.

Aos meus amigos de faculdade, que tornaram essa jornada mais leve e inesquecível. As horas de estudo, os trabalhos em grupo, as conversas nos corredores e os momentos de descontração fora da sala de aula fizeram toda a diferença. Vocês foram parte fundamental não apenas da minha formação acadêmica, mas também pessoal.

Aos professores, por todo o conhecimento transmitido e pela dedicação em nos preparar não apenas como profissionais, mas também como cidadãos conscientes. Cada disciplina, cada conselho e cada orientação foram contribuições essenciais para minha formação.

Também não poderia deixar de registrar minha gratidão às pessoas que muitas vezes não aparecem nos agradecimentos, mas que foram indispensáveis no meu percurso. Ao motorista do ônibus, que garantiu minha chegada à universidade em segurança, mesmo nos dias mais difíceis. Aos funcionários da limpeza, que cuidam com tanto zelo dos espaços da instituição, permitindo que estudássemos em ambientes mais agradáveis. À equipe da cantina e ao Restaurante Universitário (RU), que, com seu trabalho diário, ofereceram refeições e momentos de pausa que renovavam nossas energias.

A todos vocês, meu mais sincero muito obrigado. Este trabalho não é apenas o resultado de esforço individual, mas também fruto da colaboração, do carinho e do apoio de cada um que, de alguma forma, fez parte desta caminhada.

RESUMO

O transporte marítimo desempenha papel essencial no comércio internacional, mas permanece altamente dependente de combustíveis fósseis, a Organização Marítima Internacional (IMO) apontou que o transporte marítimo foi responsável por 2,8% do dióxido de carbono global, sendo responsável por parcela significativa das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE). A COP 30, realizada no Brasil, reforçou o compromisso internacional com as metas de descarbonização do setor energético, incluindo o transporte marítimo. Nos últimos anos, organismos internacionais, especialmente a IMO, estabeleceram metas rigorosas de redução de carbono, impulsionando a busca por alternativas energéticas sustentáveis. Nesse contexto, os biocombustíveis surgem como solução viável de curto e médio prazo, devido à sua capacidade de reduzir emissões sem exigir substituição imediata da frota mundial, além de sua compatibilidade com motores e infraestruturas existentes. Esta revisão bibliográfica apresenta uma análise sobre o uso de biocombustíveis no setor marítimo, abordando seus conceitos, evolução regulatória, testes realizados globalmente e as barreiras técnicas, econômicas e políticas para sua implementação. Foram encontrados 32 artigos durante a pesquisa, utilizando as palavras-chave transporte marítimo, biocombustíveis, Brasil, descarbonização e energia renovável. Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, o número de artigos foi reduzido para 23. Desses, foram lidos 18 artigos completos, os quais forneceram uma base sólida para a análise dos dados e a construção dos resultados. São examinadas experiências internacionais e latino-americanas, com destaque para o protagonismo crescente do Brasil, cuja disponibilidade de biomassa, experiência industrial e avanços recentes em testes operacionais indicam forte potencial para inserção no mercado global de combustíveis renováveis para navegação. A pesquisa também avalia cenários futuros projetados pela IMO, avanços tecnológicos esperados e transformações estruturais no setor marítimo, destacando a importância de políticas públicas consistentes, investimentos em infraestrutura e mecanismos de governança para viabilizar a transição energética. Conclui-se que os biocombustíveis representam alternativa estratégica para a descarbonização do transporte marítimo, combinando viabilidade técnica, potencial ambiental e oportunidades econômicas, especialmente para o Brasil e América Latina.

Palavras-chave: biocombustíveis; transporte marítimo; descarbonização; energia renovável; Brasil.

ABSTRACT

Maritime transport plays a crucial role in international trade but remains highly dependent on fossil fuels. The International Maritime Organization (IMO) pointed out that maritime transport was responsible for 2.8% of global carbon dioxide emissions, accounting for a significant share of global greenhouse gas (GHG) emissions. COP 30, held in Brazil, reinforced the international commitment to decarbonization targets in the energy sector, including maritime transport. In recent years, international bodies, especially the IMO, have set strict carbon reduction goals, driving the search for sustainable energy alternatives. In this context, biofuels emerge as a viable short- and medium-term solution due to their ability to reduce emissions without the immediate need to replace the global fleet, as well as their compatibility with existing engines and infrastructure. This literature review presents an analysis of the use of biofuels in the maritime sector, addressing their concepts, regulatory evolution, tests conducted globally, and the technical, economic, and political barriers to their implementation. A total of 32 articles were found during the research, using keywords such as maritime transport, biofuels, Brazil, decarbonization, and renewable energy. After applying inclusion and exclusion criteria, the number of articles was reduced to 23. Of these, 18 full articles were read, providing a solid foundation for data analysis and result construction. International and Latin American experiences are examined, with a focus on Brazil's growing role, whose biomass availability, industrial experience, and recent progress in operational testing indicate strong potential for integration into the global renewable fuel market for shipping. The research also evaluates future scenarios projected by the IMO, expected technological advancements, and structural transformations in the maritime sector, highlighting the importance of consistent public policies, investments in infrastructure, and governance mechanisms to enable the energy transition. It concludes that biofuels represent a strategic alternative for the decarbonization of maritime transport, combining technical feasibility, environmental potential, and economic opportunities, especially for Brazil and Latin America.

Keywords: biofuels; maritime transport; decarbonization; renewable energy; Brazil.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Análise dos trabalhos selecionados	47
Quadro 2-Facilidade de Produção dos Biocombustíveis	52
Quadro 3- Potencial de Sustentabilidade	58
Quadro 4- Adequação para Navios	61
Quadro 5 - Vantagens e desvantagens dos biocombustíveis.....	62
Quadro 6- Biocombustível mais adequado.....	64

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo Geral	13
2.2 Objetivos Específicos	13
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1 Biocombustíveis: Conceitos e Classificações	14
3.1.1 Definição e Princípios Fundamentais	14
3.1.2 Histórico do Uso de Biocombustíveis	14
3.1.3 Classificação por Geração	17
3.1.4 Tipos de Biocombustíveis Relevantes para Navios	20
3.2 Regulações Internacionais para Emissões no Setor Marítimo	23
3.2.1 Contextualização Histórica das Regulações Ambientais no Transporte Marítimo	23
3.2.2 A Organização Marítima Internacional (IMO) e suas Principais Diretrizes e regulamentações	24
3.2.3 Certificações e Padrões Técnicos	26
3.2.4 Impactos Econômicos e Operacionais das Regulações	28
3.3 Experiências e Testes	30
3.3.1 Introdução: a importância da experimentação na transição energética marítima	30
3.3.2 Testes realizados por companhias de navegação	31
3.3.3 Experiências na América Latina e o papel do Brasil	32
3.3.4 Impactos econômicos dos testes com biocombustíveis	33
3.4 Barreiras e Oportunidades	35
3.4.1 Barreiras técnicas observadas nos testes	35
3.4.2 Barreiras Técnicas, Econômicas, Políticas e Regulatórias	36
3.4.3 Oportunidades para o Brasil e a América Latina	38
3.5 Perspectivas Futuras	40
3.5.1 Cenários projetados pela IMO	40
3.5.2 Mudanças estruturais e econômicas esperadas no setor marítimo	41
3.5.3 Perspectivas para o Brasil e América Latina na transição energética	42
4 METODOLOGIA	44

4.1 Caracterização Metodológica da Pesquisa	44
4.2 Seleção dos dados da Literatura	44
4.3 Análise e Tratamento dos Dados Bibliográfico	45
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1 Processo de Produção dos Biocombustíveis	51
5.2 Emissões de GEE (gCO₂eq/t.km).....	54
5.2.1 Potencial de Sustentabilidade	57
5.2.2 Adequação para Navios	60
5.3 Vantagens e Desvantagens	62
5.4 Biocombustível mais adequado	64
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

O transporte marítimo constitui um dos pilares fundamentais do comércio internacional, sendo responsável por movimentar aproximadamente 80% de todas as mercadorias comercializadas globalmente. A dependência histórica de combustíveis fósseis pesados fez com que o setor contribuísse de forma significativa para emissões de gases de efeito estufa (GEE) e outros poluentes atmosféricos, como óxidos de enxofre (SOx) e de nitrogênio (NOx), tornando urgente a necessidade de transição energética. Nas últimas décadas, o aumento da conscientização sobre os impactos ambientais da navegação incluindo aquecimento global, acidificação dos oceanos e doenças respiratórias levou organismos internacionais a estabelecerem mecanismos regulatórios cada vez mais rigorosos. A Organização Marítima Internacional (IMO) revisou, em 2023, sua Estratégia de Redução de Emissões, determinando metas ambiciosas como a redução absoluta de 20–30% das emissões até 2030 e neutralidade de carbono até 2050.

Entre as soluções estudadas, os biocombustíveis surgem como alternativa concreta e de implementação relativamente rápida, sobretudo por sua capacidade de operar como combustíveis “*drop-in*”, permitindo uso imediato na frota existente (Irena, 2023). Combustíveis como biodiesel, óleo vegetal hidrotratado (HVO), biometanol, bioetanol e biometano liquefeito (bio-LNG) apresentam potencial para reduzir significativamente as emissões do setor, especialmente quando produzidos a partir de resíduos agrícolas ou fontes renováveis.

A América Latina, especialmente o Brasil, possui vantagens competitivas para se tornar líder global nesse processo. Segundo relatório da Empresa de Pesquisa Energética (Executiva, 2025), o país apresenta enorme disponibilidade de biomassa sustentável, ampla expertise industrial e condições climáticas favoráveis para expansão de matérias-primas energéticas, além de forte capacidade de produção de combustíveis renováveis.

Testes realizados por companhias brasileiras desde 2023, como Petrobras, Vibra e Transpetro, reforçam a viabilidade técnica da utilização de biocombustíveis no ambiente marítimo, com misturas que variam entre 24% e 30% de biodiesel, além de estudos com B100 que significa biodiesel 100% puro (sem mistura com diesel fóssil), autorizados pela Agência Nacional do Petróleo (ANP). Esses testes posicionam o país como referência no uso de combustíveis de baixo carbono no setor de navegação. (Petrobras, 2023)

Apesar dessas perspectivas, a transição energética marítima enfrenta obstáculos técnicos, econômicos e regulatórios. O Relatório do World Economic Forum (Economic, 2024)

destaca desafios como falta de infraestrutura de *bunkering* verde, custos elevados de produção e competição global por biomassa. De forma complementar, projeções da IEA (International Energy Agency, 2024) indicam que os avanços tecnológicos esperados como eletrolisadores mais eficientes, e-fuels competitivos e melhorias em motores dual-fuel devem acelerar a transição nas próximas duas décadas, tornando os combustíveis renováveis e viáveis.

Diante desse contexto, este trabalho analisa a evolução das regulações ambientais aplicadas ao transporte marítimo, examinar a literatura técnica sobre biocombustíveis aplicados ao setor, identificar barreiras e oportunidades, discutir projeções futuras da IMO e avaliar o papel estratégico do Brasil e da América Latina na transição energética marítima. Busca-se produzir uma análise abrangente e estruturada, que considere não apenas os aspectos técnicos e regulatórios, mas também as dimensões econômicas, geopolíticas e ambientais que influenciam o futuro do setor.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar uma revisão bibliográfica sobre o uso de biocombustíveis no setor marítimo, abordando aspectos relacionados à sua produção, vantagens, desvantagens e potencial para promover a sustentabilidade.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar os principais tipos de biocombustíveis aplicáveis ao transporte marítimo;
- Sistematizar os impactos ambientais e operacionais do uso desses combustíveis, com base em estudos de caso e revisões comparativas;
- Analisar as barreiras técnicas, econômicas e logísticas à implementação dos biocombustíveis no setor naval;
- Analisar o papel das políticas públicas e das regulamentações internacionais no incentivo ao uso de combustíveis alternativos.;

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Biocombustíveis: Conceitos e Classificações

3.1.1 Definição e Princípios Fundamentais

Os biocombustíveis podem ser entendidos como combustíveis derivados de biomassa renovável, isto é, de materiais orgânicos originados de plantas, resíduos agrícolas, florestais ou de micro-organismos. O desenvolvimento do biocombustível, que surgiu na interface da agricultura e da energia, tem sido considerado como um dos desenvolvimentos agrícolas mais significativos dos últimos anos. Essa definição abrange uma ampla gama de substâncias com potencial energético, desde os tradicionais etanol e biodiesel até novas formas de energia renovável, como o bio-hidrogênio e os e-fuels (Lourenzani; Caldas, 2014).

O diferencial dos biocombustíveis em relação aos combustíveis fósseis está no ciclo do carbono. Enquanto o petróleo, o carvão e o gás natural liberam na atmosfera carbono que ficou armazenado por milhões de anos, os biocombustíveis devolvem apenas o carbono recentemente capturado pelas plantas durante a fotossíntese. Assim, em teoria, eles podem ser considerados carbono-neutros. Em geral, devido à menor eficiência na conversão de energia, os sistemas de bioenergia exigem uma maior quantidade de energia primária em comparação com os sistemas de energia convencionais ou fósseis. No entanto, essa demanda adicional de energia primária provém principalmente da fração de energia renovável presente na matéria-prima utilizada. Por outro lado, o consumo de energia fóssil nesses sistemas é significativamente menor. Outro ponto fundamental é que os biocombustíveis podem ser produzidos em diferentes formas: líquida (etanol, biodiesel, HVO, biometanol), gasosa (biogás, bio-LNG) e sólida (biocarvão, pellets de biomassa, menos aplicados no setor marítimo). (Cherubini; Strømman, 2011).

3.1.2 Histórico do Uso de Biocombustíveis

O uso de biocombustíveis como fonte de energia não é um fenômeno recente, mas um capítulo contínuo na história do desenvolvimento humano. Desde os primórdios da civilização, o ser humano recorreu à biomassa como principal recurso energético, utilizando madeira e resíduos orgânicos para aquecimento, cozimento e iluminação. Durante milênios, a biomassa

foi a base da matriz energética mundial, predominando até o advento da Revolução Industrial. Em vários países, a biomassa é considerada uma importante fonte de energia, principalmente em áreas rurais, a utilização da biomassa é, por vezes, a forma mais barata de produzir eletricidade ou ar quente para secagem de produtos agrícolas. (Silva; Carlos; Rocha, 2010)

A história moderna dos biocombustíveis começou no final do século XIX, quando os primeiros motores de combustão interna foram desenvolvidos. O inventor Rudolf Diesel, por exemplo, projetou seu motor original utilizando óleo de amendoim como combustível durante a Feira Internacional de Paris, ocorrida entre abril e novembro de 1900. Diesel havia desenvolvido um motor para queimar combustíveis fósseis, inicialmente pó de carvão mineral e posteriormente petróleo e derivados (Pinho; Suarez, *[S.d.]*). O próprio Henry Ford, ao desenvolver o Modelo T, idealizou um automóvel movido a etanol derivado de plantas. O Modelo T, lançado em 1908, permaneceu em produção até 1927, era um carro com preços populares que tem sido apontado como o primeiro veículo flex (Lourenzani; Caldas, 2014). Esses fatos demonstram que os biocombustíveis não eram apenas uma alternativa emergencial, mas uma opção desde os primórdios da motorização.

No entanto, com a ascensão do petróleo e o desenvolvimento de uma rede global voltada para sua exploração, refino e distribuição, os biocombustíveis perderam espaço no início do século XX. A abundância e o baixo custo do petróleo tornaram-no a principal fonte energética do mundo, atribuindo uma posição inferior aos combustíveis de origem vegetal a um papel secundário. Foi apenas nas décadas de 1970 e 1980, com a crise mundial do petróleo, que o tema voltou a ganhar força. O aumento repentino dos valores do barril e a dependência energética de países importadores, estimularam o interesse por fontes alternativas. Nesse contexto, surgiram programas nacionais de incentivo à produção de biocombustíveis, entre os quais o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), foi uma iniciativa do Governo Federal de incentivo à produção de álcool combustível para substituir a gasolina em motores do ciclo Otto, lançado pelo governo brasileiro em 1975.

O Proálcool foi criado com a intenção de substituir parcialmente a gasolina pelo etanol, aproveitando a grande acessibilidade de cana-de-açúcar no país. O programa resultou em avanços tecnológicos bastante significativos, tanto na produção quanto no uso de etanol combustível, além de consolidar a indústria sucroalcooleira como um pilar da economia nacional. O sucesso brasileiro inspirou diversos outros países a investirem em pesquisas e políticas voltadas à bioenergia, especialmente nas décadas seguintes.

Durante os anos 1990 e início dos 2000, o debate sobre as mudanças climáticas e o aquecimento global trouxe uma nova dimensão ao tema. O uso de biocombustíveis passou a ser

visto não apenas como uma alternativa econômica, mas como uma ferramenta estratégica para a redução das emissões de gases de efeito estufa. A assinatura do Protocolo de Kyoto, em 1997, com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e combater algumas mudanças climáticas e a intensificação das discussões sobre sustentabilidade levaram à criação de novos programas internacionais de incentivo à produção e ao consumo de biocombustíveis (Miola, 2010).

Nessa fase, a produção de biodiesel ganhou destaque. Esse combustível, produzido a partir de óleos vegetais e gorduras animais, começou a ser utilizado em larga escala, substituindo parcialmente o óleo diesel em veículos automotores e em equipamentos de grande porte. O biodiesel tornou-se um símbolo da segunda onda de expansão dos biocombustíveis no mundo, complementando a trajetória do etanol (Renó; Palacio; Lora, 2014).

O século XXI consolidou os biocombustíveis como parte essencial da transição energética global. A busca por independência energética, o aumento da consciência ambiental e as pressões internacionais por sustentabilidade reforçaram a necessidade de diversificar as fontes de energia. Os biocombustíveis passaram, então, a ocupar um papel central nas políticas energéticas de diversos países, com destaque para Brasil, Estados Unidos, Índia, China e membros da União Europeia (Silva, 2023).

No caso brasileiro, o sucesso do etanol e a criação do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), foi lançado em dezembro de 2004 e institucionalizado pela Lei nº 11.097/2005, é um programa interministerial do Governo Federal que objetiva a implementação de forma sustentável, tanto técnica, como economicamente, a produção e uso do Biodiesel, com enfoque na inclusão social e no desenvolvimento regional, via geração de emprego e renda (Brasil, 2025). Em 2004, representaram marcos importantes. O país tornou-se referência mundial na produção e no uso de combustíveis renováveis, combinando tecnologia agrícola avançada com políticas públicas eficazes. O desenvolvimento dos veículos flex fuel consolidou o mercado interno e mostrou ao mundo que era possível combinar eficiência energética, sustentabilidade e viabilidade econômica.

Em âmbito global, o uso de biocombustíveis expandiu-se para diferentes setores da economia. Inicialmente concentrados no transporte terrestre, esses combustíveis começaram a ser testados em aviões, embarcações e geradores estacionários. A adoção dos biocombustíveis no setor marítimo é um dos capítulos mais recentes e promissores dessa história. Tradicionalmente, os navios utilizam combustíveis de alta densidade energética, mas também altamente poluentes, como o óleo combustível pesado (HFO). Com a adoção de novas regras internacionais para o controle de emissões especialmente as definidas pela Organização

Marítima Internacional (IMO), o setor naval passou a buscar alternativas mais limpas e sustentáveis (Agência europeia, 2023).

O histórico do uso de biocombustíveis demonstra uma trajetória de avanços, retrocessos e reinvenções. O que começou como uma solução artesanal baseada em biomassa sólida evoluiu para uma indústria complexa e tecnologicamente sofisticada, capaz de produzir combustíveis líquidos e gasosos de alta eficiência. Essa evolução reflete não apenas o progresso científico e tecnológico, mas também a mudança de mentalidade em relação à sustentabilidade e à responsabilidade ambiental (Miola, 2010).

Hoje, os biocombustíveis representam uma ponte entre o modelo energético atual e o futuro das energias limpas. Sua trajetória histórica evidencia o papel central que desempenham na transição global para uma economia de baixo carbono. No setor marítimo, em particular, o uso crescente desses combustíveis sinaliza o início de uma nova era, em que eficiência energética e preservação ambiental caminham lado a lado.

3.1.3 Classificação por Geração

A evolução dos biocombustíveis ao longo das últimas décadas permitiu sua classificação em diferentes gerações, de acordo com a natureza das matérias-primas utilizadas e o grau de desenvolvimento tecnológico aplicado em sua produção. Essa classificação reflete o avanço progressivo das pesquisas e o esforço global para superar as limitações associadas às primeiras formas de biocombustíveis, ampliando sua eficiência energética e reduzindo o impacto ambiental.

Os biocombustíveis de primeira geração foram os primeiros a serem produzidos em escala comercial e são derivados de matérias-primas alimentares, como cana-de-açúcar, milho, soja e óleo de palma, mais de 95% da matéria-prima utilizada na produção de biodiesel é considerada de primeira geração e são, na sua maioria, oriundas de plantações de sementes oleaginosas comestíveis (Duarte, 2022). Sua principal vantagem está na tecnologia consolidada e na infraestrutura de produção já estabelecida. O etanol e o biodiesel são os principais exemplos dessa categoria. Apesar de sua ampla utilização, os biocombustíveis de primeira geração enfrentam críticas quanto à competição com a produção de alimentos e à ocupação de terras agrícolas, o que levanta preocupações sobre segurança alimentar e sustentabilidade a longo prazo, além disso, a produção de biodiesel oriundo de matérias primas de primeira

geração (óleos comestíveis) pode causar impactos negativos ao meio ambiente e vida selvagem em algumas regiões (Duarte, 2022).

Os biocombustíveis de segunda geração surgiram como resposta a essas limitações. Eles são produzidos a partir de resíduos, como materiais lignocelulósicos provenientes de resíduos agrícolas, florestais e industriais, além de óleos e gorduras residuais, que não competem diretamente com o setor alimentício. Essa categoria inclui o etanol celulósico, o bio-óleo e o biogás obtido de resíduos orgânicos.

O biocombustível de segunda geração vem despertando interesse mundial visto que libera para a atmosfera uma quantidade menor de dióxido de carbono, se mostrando mais ecologicamente correto em comparação com as matérias-primas utilizadas para produção de biocombustíveis de primeira geração (Lloyd's Register, 2024). A grande vantagem dos biocombustíveis de segunda geração é o uso de matérias-primas abundantes e de baixo custo. Além disso, seu potencial de redução de emissões é significativamente maior do que o dos combustíveis fósseis, contribuindo diretamente para as metas de descarbonização do setor de transportes. Essa geração também promove a economia circular, transformando resíduos em produtos de valor energético. O principal desafio técnico dessa geração está na complexidade dos processos de conversão e de coleta de resíduos.

Com o avanço das pesquisas em biotecnologia e engenharia genética, surgiram os biocombustíveis de terceira geração, que utilizam microalgas e cianobactérias como matéria-prima. As microalgas destacam-se por sua alta produtividade e capacidade de capturar grandes quantidades de dióxido de carbono durante o processo de fotossíntese, as microalgas que vem conquistando espaço em consequência das taxas de crescimento rápido e elevado teor de óleo (Duarte, 2022). Em condições controladas, podem produzir óleos e lipídios com alta densidade energética, que podem ser convertidos em biodiesel, bioquerosene e outros biocombustíveis líquidos que podem ser usados nos transportes viário e marítimo.

Além de sua eficiência, os biocombustíveis de terceira geração apresentam um diferencial importante que é produção que não exige o uso de grandes áreas agrícolas. Podem ser cultivados em sistemas fechados, utilizando água salgada, residual ou de reuso, o que elimina a concorrência com o abastecimento de água potável e a agricultura convencional. Essa característica faz das microalgas uma das alternativas mais promissoras para o futuro da bioenergia, especialmente em países com litoral extenso, como o Brasil que contém grande extensão litorânea. No entanto, apesar dos benefícios da utilização do biodiesel de algas, mais pesquisas ainda são necessárias visto que a implementação desta técnica ainda é inviável economicamente para aplicações industriais (Duarte, 2022).

Os biocombustíveis de quarta geração representam o estágio mais avançado do desenvolvimento tecnológico é um campo emergente de pesquisa que demanda investigações futuras para maior aprofundamento, visto que apresenta potencial para aprimorar os biocombustíveis tanto em aspectos quantitativos quanto qualitativos, promovendo melhor desempenho econômico e maior rendimento. Eles utilizam processos de engenharia genética, biotecnologia sintética e captura de carbono para criar sistemas de produção altamente eficientes. Essa geração busca combinar a produção de energia renovável com a remoção de dióxido de carbono da atmosfera, configurando-se como uma tecnologia de emissão negativa. Entre os projetos mais promissores estão os que envolvem o uso de organismos geneticamente modificados capazes de converter CO₂ diretamente em hidrocarbonetos líquidos. De acordo com (Duarte, 2022), dentre os benefícios da utilização do biodiesel de quarta geração destacam-se a maior capacidade de absorção de CO₂, alto teor de energia e taxa de crescimento rápido. Porém necessita de um elevado investimento, e as pesquisas ainda se encontram no estágio inicial

Essa classificação por gerações evidencia a trajetória evolutiva dos biocombustíveis rumo a uma maior sustentabilidade. Enquanto as primeiras gerações estavam focadas na substituição direta dos combustíveis fósseis, as gerações mais recentes buscam uma integração mais ampla com as metas ambientais globais, aliando eficiência energética, economia circular e inovação biotecnológica, como a terceira e quarta geração (Oloruntobi, 2025).

No contexto do transporte marítimo, as gerações mais recentes de biocombustíveis apresentam vantagens significativas. Os biocombustíveis de segunda, terceira e quarta gerações oferecem alta densidade energética, baixo teor de enxofre e emissões reduzidas, tornando-se opções cada vez mais relevantes para navios de grande porte. Além disso, a produção em larga escala desses combustíveis a partir de resíduos e algas tem potencial para reduzir os custos operacionais do setor, ao mesmo tempo em que contribui para a sustentabilidade global (Mustakim; Mangan; Palacin, 2025).

Assim, a classificação por geração permite compreender como os avanços tecnológicos vêm moldando o futuro dos biocombustíveis e como cada etapa representa uma resposta a desafios anteriores. À medida que as pesquisas progridem, espera-se que as gerações mais avançadas se tornem economicamente competitivas e amplamente utilizadas no setor marítimo, consolidando uma nova era de energia limpa e eficiente para a navegação mundial (Eremeeva, 2025).

3.1.4 Tipos de Biocombustíveis Relevantes para Navios

A busca por fontes de energia renováveis e de baixa emissão de carbono tem se tornado uma prioridade para o setor marítimo mundial. Esse movimento é resultado das metas globais de redução de emissões de gases de efeito estufa e da necessidade de adequação às novas normas da Organização Marítima Internacional (IMO), que determinam limites cada vez mais rigorosos para o teor de enxofre e dióxido de carbono nos combustíveis navais.

Nesse contexto, diversos biocombustíveis surgem como alternativas tecnicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis para substituir, total ou parcialmente, os combustíveis fósseis utilizados nas embarcações. Entre os principais biocombustíveis relevantes para navios destacam-se o biodiesel (FAME), o óleo vegetal hidrotratado (HVO), o biometanol, o bioetanol, o biogás que, quando liquefeito, é chamado de Bio-LNG e os e-fuels ou combustíveis sintéticos.

O biodiesel é um dos biocombustíveis mais consolidados em escala global e o primeiro a ser considerado para uso comercial em embarcações. É obtido por meio da reação química de transesterificação, que converte óleos vegetais, gorduras animais ou óleos residuais em ésteres metílicos de ácidos graxos. O resultado é um combustível líquido de boa fluidez menos prejudicial do que diesel, com características próximas às do diesel fóssil. O biodiesel pode ser utilizado em motores marítimos sem grandes modificações. Uma de suas maiores vantagens é a significativa redução das emissões de dióxido de carbono, enxofre e material particulado, além de ser biodegradável e não tóxico. Entretanto, apresenta algumas limitações: tem menor estabilidade oxidativa e pode sofrer degradação quando exposto à umidade, à luz solar ou a altas temperaturas. Em ambientes frios, tende a formar cristais, o que exige sistemas de aquecimento nos tanques de armazenamento. Apesar disso, seu uso vem crescendo em portos e embarcações de pequeno e médio porte, sendo considerado um combustível de transição importante para a descarbonização do transporte marítimo (Cativa, 2024).

O HVO (Hydrotreated Vegetable Oil), ou óleo vegetal hidrotratado, representa uma evolução tecnológica em relação ao biodiesel. Ele é produzido a partir de óleos vegetais ou gorduras animais submetidos a um processo de hidrogenação catalítica em altas temperaturas e pressões. Nesse processo, o oxigênio é removido e a estrutura molecular resultante se aproxima da estrutura molecular dos hidrocarbonetos fósseis, o que confere ao óleo vegetal hidrotratado uma excelente compatibilidade com motores a diesel convencionais. Diferentemente do biodiesel, o HVO não contém oxigênio em sua composição e apresenta maior densidade energética, estabilidade térmica e resistência à oxidação. Além disso, mantém boas

propriedades de fluxo a frio, o que o torna especialmente adequado para embarcações que operam em climas frios ou em longas travessias oceânicas. Segundo Santos (2024, p. 1)

O HVO é uma mistura de hidrocarbonetos renovável, completamente miscível com diesel, de baixa densidade, alto número de cetano (> 80), baixa concentração de compostos aromáticos e quase isento de sulfetos enquanto que o diesel é composto por hidrocarbonetos com cadeias carbônicas de 9 a 28 átomos de carbono. (Santos 2024, p. 1)

Seu principal obstáculo é o custo de produção, ainda elevado devido à necessidade de hidrogênio e ao uso de catalisadores metálicos. Mesmo assim, é considerado um dos biocombustíveis mais promissores para o setor naval, pois combina eficiência operacional com baixas emissões e elevada estabilidade.

O biometanol vem se destacando como combustível para o futuro da navegação sustentável. Produzido a partir da gaseificação de biomassa ou da digestão de resíduos orgânicos, o biometanol é quimicamente idêntico ao metanol fóssil, porém com origem renovável. Pode ser utilizado em motores marítimos adaptados, em turbinas e em células a combustível, oferecendo grande versatilidade de aplicação. Sua principal vantagem está na queima extremamente limpa, com emissões muito baixas de óxidos de enxofre e nitrogênio.

O biometanol também apresenta um elevado índice de octanagem e excelente miscibilidade com água, o que facilita o controle de derramamentos e reduz riscos ambientais. Contudo, o manuseio do metanol exige cuidados devido à sua toxicidade e inflamabilidade, sendo necessário o uso de materiais compatíveis e sistemas de segurança aprimorados nos tanques e dutos de abastecimento. O alto custo faz com que o avanço desse biocombustível não seja tão rápido pois esbarra nesse contexto relacionado ao valor de produção. De acordo com Luiza, Carlos e Eduardo

Espera-se que nos próximos anos, o desenvolvimento tecnológico das tecnologias de produção de biometanol pela rota da gaseificação diminua os custos de produção deste biocombustível, o que aumentaria a viabilidade econômica de plantas de biometanol anexas, nas condições do setor sucroalcooleiro brasileiro. (Renó; Palacio; Lora, 2014)

A expectativa é que, nos próximos anos, esse combustível ganhe espaço como uma alternativa estratégica de médio prazo para a descarbonização do transporte marítimo.

O bioetanol também ocupa posição de destaque entre os combustíveis renováveis aplicáveis ao setor naval. A disponibilidade de palhas, folhas, resíduo de exploração madeireira, rejeitos agrícolas e outros, tem despertado o interesse para seu uso como matéria-prima na produção de bioetanol, mais precisamente o etanol de segunda geração (Souza, 2022). Obtido a partir da fermentação de açúcares ou amidos presentes em matérias-primas como cana-de-açúcar, milho, beterraba e trigo, o bioetanol é um combustível líquido com alto potencial de

redução de emissões. Sua queima é mais completa e limpa do que a da gasolina e do diesel, emitindo menores quantidades de poluentes atmosféricos e praticamente nenhum enxofre. No transporte marítimo, o bioetanol pode ser empregado em motores modificados ou em sistemas híbridos que utilizem células de combustível, especialmente em embarcações menores e de curta distância. Uma vantagem importante é sua ampla disponibilidade e infraestrutura de produção consolidada, o que facilita o abastecimento. No entanto, o bioetanol possui menor densidade energética do que o diesel, o que exige maior volume de armazenamento a bordo. Além disso, é higroscópico, ou seja, absorve água facilmente, o que requer atenção especial nas condições de armazenamento e transporte.

O biogás e sua versão liquefeita, o Bio-LNG (Biometano Liquefeito) ou seja, o biogás que foi purificado (removendo CO₂ e impurezas) e depois liquefeito a -160 °C para facilitar o transporte e o uso em larga escala, representam uma das alternativas mais limpas e versáteis para o setor marítimo. O biogás é produzido a partir da decomposição anaeróbia de resíduos orgânicos, como dejetos animais, resíduos agrícolas, lodos de esgoto e restos alimentares. Após purificação e remoção de impurezas, obtém-se o biometano, que possui composição semelhante à do gás natural. Quando resfriado a temperaturas extremamente baixas, o biometano liquefeito (Bio-LNG) pode ser utilizado em motores dual fuel, que operam com o uso simultâneo de dois tipos diferentes de combustível no mesmo motor ou equipamento, tanto com gás quanto com combustível líquido.

O principal benefício do Bio-LNG é sua queima extremamente limpa, resultando em menores emissões de dióxido de carbono, enxofre e material particulado. É facilmente acessível e é uma fonte de energia abundante. O seu poder calorífico é 15% a 20% superior ao dos combustíveis convencionais, tornando o LNG um combustível economicamente viável (Nicolay, 2024). Além disso, esse combustível possibilita a utilização da infraestrutura já existente de gás natural liquefeito, o que reduz custos de adaptação. Seu uso é particularmente indicado para navios de grande porte e longas rotas, onde a densidade energética e a eficiência de combustão são fatores críticos. Os desafios atuais estão relacionados ao custo de purificação e liquefação, bem como à necessidade de expandir a rede de abastecimento portuária.

Por fim, os e-fuels, também conhecidos como combustíveis sintéticos ou eletrocombustíveis, representam o estágio mais avançado da transição energética marítima. Eles são produzidos por meio da combinação de hidrogênio verde, obtido da eletrólise da água utilizando energia renovável com dióxido de carbono capturado da atmosfera ou de processos industriais. O resultado é um combustível líquido ou gasoso, quimicamente semelhante aos combustíveis fósseis, mas com pegada de carbono praticamente nula. Entre os e-fuels mais

promissores estão o e-diesel, o e-metanol e o e-amônia. Esses combustíveis podem ser utilizados em motores existentes com poucas modificações e oferecem desempenho equivalente ou superior ao dos derivados de petróleo. Os e-fuels são uma opção interessante tanto numa perspectiva técnica quanto numa perspectiva de sustentabilidade, mas ainda enfrentam desafios significativos em termos de custo e de maturidade tecnológica a médio prazo. (Carvalho, 2020)

Os e-fuels são considerados fundamentais para alcançar a descarbonização total do transporte marítimo, pois combinam alta densidade energética, compatibilidade com a infraestrutura atual e neutralidade climática. Entretanto, sua produção ainda é limitada por custos elevados e pela necessidade de grandes quantidades de energia elétrica renovável. Com o avanço das tecnologias de eletrólise e captura de carbono, espera-se que os e-fuels se tornem economicamente viáveis nas próximas décadas, transformando radicalmente a matriz energética marítima.

3.2 Regulações Internacionais para Emissões no Setor Marítimo

3.2.1 Contextualização Histórica das Regulações Ambientais no Transporte Marítimo

A história das regulações ambientais no transporte marítimo reflete a gradual conscientização internacional sobre os impactos das emissões provenientes de navios, bem como o desenvolvimento de mecanismos regulatórios capazes de mitigar esses efeitos. Durante grande parte do século XX, as operações marítimas utilizavam combustíveis pesados altamente poluentes, ricos em enxofre e geradores de elevados níveis de óxidos de nitrogênio e partículas, sem que houvesse normas internacionais consolidadas para limitar esse tipo de poluição.

Em meados das décadas de 1970 e 1980, surgiram convenções voltadas principalmente para a prevenção de derramamentos e contaminação marítima, como a Convenção MARPOL. No entanto, a regulação das emissões atmosféricas começou a ganhar força somente a partir dos anos 1990 e 2000, quando estudos passaram a evidenciar impactos sobre saúde humana, acidificação dos oceanos e chuvas ácidas associadas às emissões dos navios. A análise sugere que as emissões atmosféricas do setor de transporte marítimo representam uma parcela significativa das emissões totais, afetando a qualidade do ar e contribuindo para as mudanças climáticas e problemas de saúde humana. Além disso, a tendência atual indica que a situação irá piorar no futuro. (Miola, 2010)

Um dos marcos mais relevantes ocorreu em 2010, quando entrou em vigor uma versão revisada do Anexo VI da Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL), estabelecendo limites mais rígidos para o teor de enxofre em combustíveis marítimos, especialmente nas Emission Control Areas (ECAs). A redução de 1,50% para 1,00%, com meta futura de 0,10%, representou um avanço significativo na mitigação da poluição atmosférica causada pela navegação (Airclim, 2010). Essa mudança evidenciou o reconhecimento, por parte dos organismos internacionais, de que os navios tinham papel significativo na degradação da qualidade do ar em zonas costeiras e portuárias.

A trajetória regulatória acelerou-se ainda mais com o “IMO 2020”, em vigor desde 1º de janeiro de 2020, que reduziu globalmente o limite de enxofre nos combustíveis marítimos de 3,50% para 0,50% fora de ECAs (Maritime, 2020). Essa mudança provocou transformações profundas na cadeia logística, obrigando as empresas a adaptar suas frotas ao uso de combustíveis com baixo teor de enxofre, investir em purificadores ou buscar alternativas mais limpas, como biocombustíveis e GNL marítimo.

Essa evolução regulatória evidencia a transição de um foco restrito sobre poluição costeira para uma visão global, integrando eficiência energética, mitigação climática e incentivo ao uso de combustíveis alternativos. À medida que o comércio marítimo internacional crescia e seus impactos ambientais se tornavam mais evidentes, surgia a necessidade de políticas robustas para conter os efeitos nocivos das emissões. As regulações ambientais no transporte marítimo revelam uma trajetória marcada pela ampliação do escopo das normas, avanços tecnológicos e crescente pressão internacional por sustentabilidade.

3.2.2 A Organização Marítima Internacional (IMO) e suas Principais Diretrizes e regulamentações

A Organização Marítima Internacional (IMO) é o principal órgão regulador da navegação mundial e desempenha papel central na criação, implementação e atualização das políticas ambientais aplicadas ao setor marítimo. Criada em 1948 como uma agência especializada das Nações Unidas, a IMO possui como missão promover um transporte marítimo seguro, eficiente e ambientalmente responsável. Com o crescimento do comércio global e o aumento da consciência sobre os impactos ambientais das emissões provenientes dos navios, a IMO passou a atuar de forma mais ativa na regulamentação de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa (GEE), especialmente após 2010 (Breve história da..., 2023).

A IMO desenvolve diretrizes e regulações por meio de convenções internacionais, sendo a MARPOL o principal instrumento normativo. O Anexo VI dessa convenção, que trata especificamente da prevenção da poluição atmosférica por navios, tornou-se o eixo central das políticas ambientais marítimas contemporâneas.

Um avanço fundamental promovido pela IMO foi a introdução do Energy Efficiency Design Index (EEDI), obrigatório para navios construídos a partir de 2013. O EEDI estabelece requisitos mínimos de desempenho energético e tem como objetivo incentivar o desenvolvimento de tecnologias de eficiência, como motores modernos, melhorias hidrodinâmicas e otimização operacional. Desde 1º de janeiro de 2013, todos os navios de 400 arqueação bruta (GT) ou mais envolvidos no comércio internacional devem transportar um *Ship Energy Efficiency Management Plan* (SEEMP) a bordo. O Plano de Gestão de Eficiência Energética dos Navios é concebido como uma ferramenta de gestão específica para navios que apoia armadores e operadores no monitoramento e melhoria da eficiência do combustível durante as operações diárias e destaca-se como uma estrutura prática projetada para aprimorar o desempenho energético dos navios (AB Surveyors, 2025). Complementarmente, o SEEMP tornou-se obrigatório para todas as embarcações.

A IMO também desenvolve diretrizes técnicas visando garantir a segurança no uso de novos combustíveis. Isso inclui normas para o manuseio de combustíveis alternativos, como o Código IGF (International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-Flashpoint Fuels), que rege requisitos específicos de design para navios movidos a combustíveis gasosos ou de baixo ponto de fulgor. Esse código é fundamental para a transição energética, pois estabelece segurança para combustíveis como GNL, metanol, amônia e hidrogênio. A atuação da IMO não se limita à criação de normas, mas envolve também programas de capacitação global, especialmente para países em desenvolvimento, com o objetivo de democratizar o acesso às tecnologias e políticas de descarbonização. O programa GloMEEP (Global Maritime Energy Efficiency Partnerships), por exemplo, fomenta a implementação de medidas de eficiência energética e promove a cooperação internacional para a redução de emissões.

No contexto dos biocombustíveis, a IMO desempenha papel estratégico: ao estabelecer limites rígidos de emissões e metas de carbono, cria incentivos diretos para substituição progressiva dos combustíveis fósseis por opções sustentáveis, como biodiesel, HVO, etanol, metanol e combustíveis sintéticos. Os avanços contínuos dessas políticas demonstram a crescente relevância das regulações ambientais como motor da transição energética global no setor marítimo.

As regulamentações regionais e nacionais complementam os instrumentos globais da IMO e desempenham papel essencial na aceleração da descarbonização do transporte marítimo. Essas normas surgem para atender necessidades específicas de blocos econômicos ou países que buscam intensificar a proteção ambiental, estabelecer mecanismos próprios de controle ou criar incentivos para a adoção de combustíveis mais limpos. Além de reforçarem as metas internacionais, tais regulamentações funcionam como indutores diretos de inovação tecnológica e de modernização da frota naval mundial.

Diversos blocos econômicos e regiões estratégicas implementaram normas próprias para controlar emissões de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa. Essas medidas geralmente complementam os limites globais estabelecidos pela IMO e definem regras mais rígidas para navios que transitam por áreas específicas. Os exemplos mais relevantes de regulações regionais são as ECAs – Emission Control Areas, criadas inicialmente nas costas dos Estados Unidos, Canadá, Mar Báltico e Mar do Norte como parte dos esforços para reduzir o impacto das emissões do transporte marítimo, a OMI (Organização Marítima Internacional) e o Parlamento Europeu que estabeleceram a região do Mar Báltico como uma ECA (Área de Controle de Emissões). Esta área apresenta intensa atividade de transporte marítimo, representando 22% da tonelagem bruta total dos mares europeus (Kumar, 2025).

3.2.3 Certificações e Padrões Técnicos

A transição energética no setor marítimo, impulsionada pelas regulamentações internacionais e regionais, exige não apenas o estabelecimento de limites de emissões, mas também a definição de certificações e padrões técnicos que assegurem a segurança, a confiabilidade e a qualidade dos combustíveis alternativos. Esses padrões são essenciais para garantir que novos combustíveis possam ser utilizados em navios sem comprometer a integridade operacional, a segurança das tripulações e a eficiência dos sistemas de propulsão. Além disso, as certificações funcionam como garantias formais de que os combustíveis atendem critérios ambientais e técnicos exigidos pelos organismos reguladores e pelos operadores marítimos.

Um dos principais instrumentos nesse contexto é o International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-Flashpoint Fuels (Código IGF), desenvolvido pela IMO com o objetivo de estabelecer requisitos internacionais de segurança para embarcações que utilizam combustíveis gasosos ou de baixo ponto de fulgor. O Código IGF contém disposições obrigatórias para o arranjo, instalação, controle e monitoramento de máquinas, equipamentos e

sistemas que utilizam combustíveis de baixo ponto de ignição, atualmente focados em gás natural liquefeito (GNL) (GreenVoyage, 2025). Além disso, o Código IGF é constantemente atualizado para incluir combustíveis emergentes, acompanhando o avanço tecnológico da indústria naval.

Outro elemento central na certificação técnica é a ISO 8217, o principal padrão internacional utilizado para especificar as propriedades físicas e químicas dos combustíveis marítimos. A norma passou por diversas revisões, incluindo versões recentes que incorporam parâmetros específicos para combustíveis com baixo teor de enxofre e misturas com biocombustíveis. A norma ISO 8217 não regulamenta o teor de óleo de motor usado em combustíveis marítimos, mas regulamenta os teores de cálcio e zinco ou cálcio e fósforo nesses combustíveis (Nelyubov, 2023). Assim, evitando problemas como instabilidade oxidativa ou formação de depósitos.

Além da ISO 8217, a ISO 8216 (classificação de combustíveis) e a ISO 4259 (parâmetros de medição de propriedades de combustíveis) complementam o conjunto normativo, assegurando que análises laboratoriais e especificações de qualidade sejam consistentes e internacionalmente comparáveis. Essas normas facilitam o comércio de novos combustíveis, garantindo uniformidade e credibilidade técnica aos fornecedores.

No âmbito ambiental, destaca-se também o Certificado Internacional de Eficiência Energética (IEEC), exigido pela IMO desde a introdução do Índice de Projeto de Eficiência Energética (EEDI) aplica-se a navios novos, estabelecendo padrões de eficiência de projeto. Sua emissão depende da verificação do plano SEEMP e da conformidade com os limites de eficiência aplicáveis ao tipo e ao ano de construção da embarcação.

Com a implementação do Carbon Intensity Indicator (CII), em vigor desde 2023, que é uma medida de curto prazo adotada pela IMO para reduzir as emissões de gases de efeito estufa dos navios, novos requisitos de verificação passaram a ser aplicados. Os navios foram classificados em cinco categorias: A, B-1, B-2, C-1 e C-2 (Kim, 2024). A categoria A refere-se a tecnologias que afetam diretamente o desempenho da força do motor, como otimização linear e melhorias na geometria da hélice; a categoria B refere-se a tecnologias que atuam de forma indireta sobre a performance do motor, mas podem melhorar a eficiência quando aplicadas como tecnologias adicionais, como lubrificação do casco com ar e sistemas de energia eólica. A categoria C respeito a sistemas de aproveitamento do calor residual, que funcionam como equipamentos auxiliares independentes do motor de propulsão do navio e contribuem para o aumento da eficiência energética.

Esses padrões e certificações formam uma estrutura robusta que garante confiabilidade técnica, segurança operacional e sustentabilidade na adoção de combustíveis alternativos. Sem eles, a expansão do uso de biocombustíveis no setor marítimo seria inviável, uma vez que operadores, fabricantes de motores e autoridades portuárias não teriam parâmetros unificados para avaliar a viabilidade e a qualidade dos combustíveis. Assim, as certificações e normas técnicas constituem parte essencial da transição energética marítima, assegurando que a inovação avance de maneira segura, padronizada e ambientalmente responsável.

3.2.4 Impactos Econômicos e Operacionais das Regulações

As regulações ambientais impostas ao setor marítimo ao longo das últimas décadas têm provocado impactos profundos tanto na esfera econômica quanto na operacional. Essas normas, especialmente as estabelecidas pela IMO e complementadas por políticas regionais, têm alterado significativamente a forma como as empresas de navegação estruturam suas operações, adotam tecnologias e planejam investimentos. Embora representem avanços ambientais essenciais, as regulações trazem desafios relevantes relacionados ao aumento de custos, à necessidade de adaptação das embarcações e à reorganização de cadeias logísticas internacionais.

Um dos impactos mais imediatos das regulações é o aumento do custo dos combustíveis marítimos, principalmente após a implementação do limite global de enxofre de 0,50% em 2020, conhecido como “IMO 2020”. Segundo a (Hempel, 2025) a exigência forçou as empresas a migrarem para combustíveis mais caros, pois os sistemas de limpeza de gases (“scrubbers”), ou seja, purificadores, são caros (entre USD 2 e 8 milhões por embarcação). A instalação exige docagem seca do navio, o que o tirará de serviço (e, portanto, o deixará fora de serviço) por 2-3 semanas. Atualmente, há escassez de limpadores e disponibilidade de docas secas, dependendo do porte e da complexidade da instalação. Esse cenário representou um choque de custos especialmente para companhias de pequeno e médio porte, que não dispunham de capital para investimentos de grande escala.

Além disso, as regulações que impõem metas de eficiência energética como o EEDI e o CII exigem investimentos estruturais, como motores mais eficientes, otimização hidrodinâmica e novas tecnologias de gerenciamento energético. A adoção dessas soluções tem impacto direto no custo operacional das frotas. Com uma necessidade estimada de US\$ 2,6 trilhões. Isso representa um investimento de capital anual adicional de cerca de US\$ 91 bilhões,

o que é mais que o dobro do investimento de capital anual existente de US\$ 44 bilhões no setor de transporte marítimo (Economic, 2024).

Outro impacto econômico relevante decorre da necessidade de adequação das infraestruturas portuárias. Portos precisam se adaptar para fornecer combustíveis alternativos, como GNL, biocombustíveis e metanol. Tais mudanças geram custos que, em muitos casos, excedem a capacidade financeira de portos menores ou países em desenvolvimento, criando assimetrias regionais no cumprimento das metas ambientais.

No âmbito operacional, as regulações também têm provocado alterações significativas nas rotas e nas velocidades dos navios. O uso de combustíveis mais caros e exigências de eficiência energética levaram ao aumento do chamado *slow steaming* (cozimento lento), prática em que embarcações reduzem sua velocidade para diminuir o consumo de combustível. Essa estratégia ajuda as empresas a manterem custos operacionais sob controle, mas, por outro lado, pode aumentar o tempo de entrega de mercadorias e exigir replanejamento logístico global ainda mais elaborado.

Outro fator operacional importante envolve a complexidade crescente na gestão de combustíveis. Existe uma diversidade de opções como biodiesel, HVO e metanol requer mudanças nos sistemas de armazenamento, filtragem, manuseio e documentação. Os combustíveis alternativos têm propriedades físico-químicas distintas, exigindo cuidados adicionais para evitar contaminações, depósitos nos motores ou instabilidades químicas. Isso significa que tripulações precisam de treinamento específico, aumentando custos e tempo de adaptação. Por outro lado, é importante destacar que muitos desses impactos, embora inicialmente representem custos, trazem benefícios no longo prazo. A adoção de combustíveis mais limpos melhora a eficiência energética, reduz os gastos com manutenção e amplia a vida útil dos motores. Além disso, empresas que se adaptam rapidamente às regulações tendem a ganhar vantagem competitiva no mercado global, atraindo clientes comprometidos com metas de sustentabilidade, especialmente grandes embarcadores internacionais.

Assim, os impactos econômicos e operacionais das regulações representam um equilíbrio entre custos de transição e benefícios estruturais. Embora imponham desafios imediatos, essas políticas também promovem modernização tecnológica, redução de emissões e desenvolvimento de mercados mais eficientes. No contexto da transição energética, tais impactos são inevitáveis e, quando bem administrados, contribuem para a evolução sustentável do transporte marítimo internacional (Kumar, 2025).

3.3 Experiências e Testes

3.3.1 Introdução: a importância da experimentação na transição energética marítima

A transição energética no setor marítimo depende profundamente de processos contínuos de experimentação, testes práticos e validação de tecnologias emergentes. Diferentemente de outros setores de transporte, o ambiente marítimo apresenta desafios operacionais específicos como longos períodos de operação contínua, exposição a condições extremas, requisitos rigorosos de segurança e motores de grande porte que tornam inviável a simples adoção imediata de combustíveis ou tecnologias sem extensiva testagem prévia. Por isso, projetos-piloto, testes em embarcações reais, estudos de viabilidade e operações experimentais desempenham papel central no avanço dos biocombustíveis e de outras soluções de baixo carbono.

Desde o avanço da descarbonização, a necessidade de experimentação tornou-se ainda mais evidente com o estabelecimento de limites mais rígidos de poluição pela IMO, o que estimulou governos, instituições de pesquisa e empresas privadas a implementarem programas de teste de biocombustíveis, metanol verde, bio-LNG, HVO, e-fuels e tecnologias híbridas. Segundo (Dong, 2022), atualmente as medidas de projeto, técnicas e operacionais conhecidas estão reduzindo as emissões do setor no nível sugerido pela IMO. A experimentação é essencial porque muitos combustíveis alternativos apresentam comportamentos complexos quando aplicados em motores marítimos, como variações de viscosidade, estabilidade oxidativa, formação de depósitos, corrosão de materiais ou mudanças na eficiência térmica. Esses fatores só podem ser plenamente compreendidos por meio de testes controlados e operações reais de navegação.

No contexto dos biocombustíveis, testes são indispensáveis para avaliar misturas em diferentes proporções (B10, B20, B30, B100), diferentes matérias-primas (óleo de cozinha usado, palma, soja, sebo animal, biomassa lignocelulósica etc.) e diferentes tecnologias de processamento (HVO e FAME,). Cada tipo de combustível interage de forma distinta com os motores marítimos, e pequenas variações podem gerar grandes diferenças em confiabilidade e desempenho operacional. Por isso, companhias de navegação, fabricantes de motores e universidades têm investido fortemente em projetos-piloto, que permitem testar os combustíveis em rotas reais, coletar dados, ajustar motores e comprovar segurança.

3.3.2 Testes realizados por companhias de navegação

Algumas companhias de navegação, em parceria com empresas de energia e institutos de pesquisa, vêm conduzindo testes práticos com biocombustíveis em embarcações comerciais nos últimos anos. Essas iniciativas são fundamentais para validar a viabilidade técnica, econômica e ambiental dos combustíveis renováveis marítimos, além de gerar dados reais que podem orientar a adoção em larga escala.

Um exemplo recente é a Petrobras, que em 2023, iniciou ensaios com *bunker* marítimo contendo 24 % de biodiesel. O teste foi realizado em uma embarcação afretada pela Transpetro, no Terminal do Rio Grande (RS), e teve como objetivo verificar o desempenho do motor, o consumo de combustível, e a redução de emissões. Segundo a empresa, a mistura resultou em uma redução estimada de 17 % de gases de efeito estufa no ciclo de vida completo do combustível, comparado ao bunker 100% fóssil. (Petrobras, 2023) e esse é o segundo teste desse tipo promovido pela Petrobras. Desta vez, no entanto, o teor de biodiesel é maior em relação ao primeiro teste, quando o percentual foi de 10% em volume.

Outra empresa que se destaca é a NYK Line, que anunciou em dezembro de 2023 um programa de testes de bio-combustível em larga escala. A partir de 2024, a NYK colocou em uso e onde usou biocombustível de forma contínua por três meses em diversos tipos de navios, com o intuito de validar a estabilidade a longo prazo, além de segurança e fornecimento seguro do combustível. O teste mais recente confirmou a viabilidade operacional a longo prazo do biodiesel. Os resultados realizados com um transportador de carros e caminhões da NYK (PCTC) confirmam ainda mais a viabilidade do combustível (Executive, 2025).

Além disso, a AIDA Cruises também testou combustíveis avançados em 2024, a empresa reabasteceu o navio AIDAprima com 100% de “Bio Marine Fuel” combustível biomarinho renovável composto de resíduos orgânicos, num projeto piloto para avaliar a performance do combustível nas operações regulares dos navios para potencial uso futuro (Executive, 2025). Esse tipo de teste é especialmente valioso, porque operações de cruzeiro têm perfis de consumo e segurança muito diferentes de navios de carga.

Por fim, a armadora X-Press Feeders concluiu em 2024 seu primeiro reabastecimento de bio-metanol em Singapura, utilizando cerca de 300 toneladas métricas desse combustível em um navio dual-fuel. A empresa pretende usar mais metanol para abastecer sua frota e atingir as metas de redução de 20% nas emissões de dióxido de carbono até 2035 e atingir emissões líquidas zero até 2050. Esse teste representa um marco operacional, já que o metanol renovável

pode ser uma das rotas mais promissoras para descarbonizar o transporte marítimo, especialmente para frotas específicas (X-press feeders conclui..., 2024).

Esses testes demonstram como a indústria marítima está em fase ativa de experimentação real, validando diferentes tipos de biocombustível (biodiesel, metanol, biocombustíveis de resíduos) em navios comerciais, rotas reais e operações normais. Os resultados dessas iniciativas são cruciais para embasar decisões regulatórias, padronização técnica e investimento em infraestrutura de *bunkering* sustentável.

3.3.3 Experiências na América Latina e o papel do Brasil

A América Latina, liderada pelo Brasil, tem se destacado nas iniciativas de biocombustíveis marítimos, refletindo seu potencial industrial, geográfico e de matérias-primas renováveis. As experiências recentes mostram que o Brasil não apenas testa misturas renováveis no *bunker*, como também se posiciona estrategicamente para apoiar a descarbonização do transporte aquaviário regional e global. Um dos casos mais significativos foi citado acima que ocorreu em 2023, quando a Petrobras iniciou os testes teste com 24% de biodiesel em seu combustível marítimo para navios que operam em rotas de cabotagem.

Em 2024, outra iniciativa pioneira se consolidou a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) autorizou o uso experimental de biodiesel 100% (B100) em uma embarcação fluvial da empresa Hermasa Navegação, na região amazônica. A autorização marcou um avanço regulatório importante, pois permite testar o desempenho de motores aquaviários com biocombustível puro, sem mistura com derivado fóssil, o que pode abrir caminho para aplicações mais verdes no transporte de rios. (UOL, 2024)

Mais recentemente, em 2025, a empresa Vibra maior distribuidora de combustível e plataforma multienergia do país, e a Svitzer, empresa líder mundial em serviços de rebocadores e desde 2015 comprometida com a transformação sustentável das operações no Brasil, iniciou um projeto piloto para fornecer diesel marítimo misturado com até 30% de biodiesel para rebocadores operando no Porto de Santos (SP) (Vibra, 2025). O projeto prevê monitoramento do desempenho do combustível, avaliação operacional e impacto nas emissões, e representa uma das primeiras tentativas em larga escala de biocombustível elevado no diesel marítimo brasileiro. O projeto também representa um avanço inédito para a Svitzer, que se torna a primeira empresa do setor a testar o uso de biodiesel em rebocadores portuários no país (Guia marítimo, 2025).

Esses projetos mostram que o Brasil está assumindo um papel de liderança não apenas na produção de biocombustíveis, mas também na demonstração prática de sua aplicação marítima. Ao realizar testes com porcentagens significativas de biodiesel no combustível marítimo, o país evidencia sua capacidade tecnológica e regulatória de contribuir para a descarbonização do transporte aquaviário. Ainda que os testes sejam em fases iniciais, eles são estratégicos onde permitem avaliar o comportamento operacional dos navios, a compatibilidade com motores existentes e os ganhos ambientais. Além disso, geram dados que podem apoiar políticas públicas mais ambiciosas para o uso de combustíveis verdes nas rotas latino-americanas, incentivando outras nações da região a adotarem estratégias similares. Portanto, as experiências brasileiras representam mais do que simples pilotos, são pontos de partida para uma transformação estrutural no transporte marítimo latino-americano, integrando produção local de biocombustíveis, inovação tecnológica, regulação e compromisso climático.

3.3.4 Impactos econômicos dos testes com biocombustíveis

Os testes práticos com biocombustíveis não são apenas laboratórios de tecnologia: são também experiências econômicas que revelam custos diretos e indiretos, possibilitam estimativas de viabilidade e formam a base para decisões de investimento. Em termos imediatos, os custos do próprio combustível tendem a ser mais altos que os dos produtos fósseis comparáveis, especialmente quando a matéria-prima é de origem avançada (ex.: HVO, biometanol produzidos por gaseificação) ou quando a produção ainda é de pequena escala. Estudos de viabilidade econômica e relatórios de mercado mostram que, em muitos casos, o preço por tonelada do combustível renovável pode superar o do VLSFO (Very Low Sulfur Fuel Oil) ou do MGO (Marine Gas Oil), dependendo das políticas de subsídios e do preço de créditos de carbono. Essa diferença de preço é um dos principais fatores que explicam por que muitos testes são financiados por parcerias público-privadas ou com apoio de grandes fornecedores de energia. Diversas questões ainda precisam ser abordadas para garantir a viabilidade comercial do sistema proposto, incluindo uma avaliação detalhada (Wu, 2023).

Os custos de adaptação (instalação de equipamento de abastecimento, atualização de tanques, formação de tripulação, mudanças em procedimentos e eventuais ajustes nos motores) também foram quantificados em estudos e projetos-piloto. Embora a instalação de um purificador possa ser cara (milhões de dólares por navio), a adaptação para certos biocombustíveis líquidos pode exigir investimentos menores, mas ainda relevantes especialmente em grandes frotas, se for ao todo, podemos chegar a um investimento de capital

anual adicional de cerca de US\$ 91 bilhões (Economic, 2024). Há ainda impactos macroeconômicos e na cadeia de abastecimento. Projetos-piloto que demandam volumes fixos de biocombustível ajudam a criar demanda inicial, viabilizando investimentos em produção local e logística (economias de escala). Porém, em mercados onde a oferta permanece fragmentada, os prêmios de preço persistem (Economic, 2024).

A avaliação ambiental dos testes práticos combina medições diretas (tank-to-wake, ou emissões de combustão a bordo) com avaliações de ciclo de vida (well-to-wake ou LCA) para estimar benefícios reais em termos de redução de GEE e poluentes. Os resultados recentes reforçam que certas misturas e biocombustíveis podem entregar reduções substanciais de emissões quando produzidos de forma sustentável e corretamente rastreados. Um resultado de ampla repercussão surgiu nas campanhas coordenadas pelo Global Centre for Maritime Decarbonisation (GCMD) em Singapura, que completou uma série de testes com *blends* de FAME (B30) e reportou uma redução de aproximadamente 27,9% nas emissões (comparação operacional tank-to-wake) quando comparado ao VLSFO convencional, em operações de um navio porta-contêineres operado pela Hapag-Lloyd no porto de Roterdã. (teste com B30 fornecido pela BP) envolvidas. Esse resultado foi verificado durante teste real de abastecimento e foi reportado em veículos de imprensa e comunicados das organizações envolvidas (X-press Feeders conclui..., 2024).

No entanto, a magnitude da redução depende fortemente do tipo de matéria-prima e do método de produção. Estudos comparativos de LCA mostram variação significativa entre combustíveis alguns biocombustíveis avançados (produzidos a partir de resíduos ou por processos de gaseificação com captura de carbono) podem reduzir emissões de ciclo de vida em percentuais elevados, enquanto biocombustíveis de primeira geração, produzidos a partir de culturas com desmatamento associado, podem ter benefícios reduzidos ou até negativos quando se considera todo o ciclo (cultivo, processamento e transporte). Devido às emissões líquidas negativas de carbono de seus ciclos de vida, todas as vias baseadas em resíduos apresentam um potencial de redução de gases de efeito estufa acima de 100% em relação ao óleo combustível com baixo teor de enxofre (Masum, 2023).

Além das emissões de CO₂, testes mostram redução substancial em SO_x e material particulado para misturas com biocombustíveis e para combustíveis como HVO, que praticamente eliminam o enxofre. Isso tem implicações diretas na qualidade do ar portuário e na saúde das populações costeiras

Finalmente, a literatura técnica indica que a rastreabilidade e a certificação de sustentabilidade são determinantes para que os benefícios ambientais medidos sejam legítimos.

Ensaaios que incorporaram sistemas de “rastreamento” (rastreadabilidade do combustível desde a origem) e LCAs robustas conseguiram demonstrar reduções efetivas, por isso, as estruturas de certificação e o uso de metodologias padronizadas de LCA são fundamentais para validar resultados de emissões reportados em testes.

3.4 Barreiras e Oportunidades

3.4.1 Barreiras técnicas observadas nos testes

Os ensaios práticos realizados em navios e terminais ao redor do mundo têm confirmado que, embora os biocombustíveis apresentem promessas ambientais relevantes, sua implementação enfrenta barreiras técnicas concretas que precisam ser geridas antes da adoção em larga escala. Entre os obstáculos mais recorrentes destacam-se a compatibilidade com motores e sistemas de combustível, estabilidade do combustível durante armazenamento e riscos de contaminação.

Primeiro, a compatibilidade com motores e sistemas de injeção é uma barreira frequente. Testes com misturas elevadas (por exemplo, uma mistura composta por 30% de ésteres metílicos de ácidos graxos puros FAME e 70% de óleo combustível com teor de enxofre muito baixo - VLSFO) demonstraram bom desempenho em termos de emissões, mas também revelaram que alguns motores e componentes do sistema de combustível apresentaram comportamento diferente (formação de depósitos, variação na lubrificação e necessidade de ajuste de mapas de injeção), exigindo monitoramento contínuo e, em alguns casos, intervenções técnicas. Essa instabilidade do biodiesel é um problema grave que ainda não foi resolvido de forma satisfatória (Centro de descarbonização marítima..., 2024).

A estabilidade oxidativa e a tendência à degradação são outros aspectos críticos. Certos biocombustíveis (particularmente FAME) têm maior propensão à oxidação e à formação de ácidos e sedimentos quando expostos a armazenamento prolongado ou a contaminação por água. Ensaaios laboratoriais e operacionais indicam que misturas com níveis elevados de biocombustível exigem controles de qualidade mais rígidos, aditivos antioxidantes e rotinas de limpeza de tanques (filtração, separadores) para evitar entupimentos e falhas em filtros e injetores. Um dos principais problemas que limitam o uso do biodiesel é a dificuldade em manter o combustível dentro dos padrões especificados por um período prolongado. O biodiesel oxida com muito mais facilidade do que o diesel, e os produtos finais da oxidação alteram suas

propriedades físico-químicas, causando a formação de gomas insolúveis que podem obstruir os filtros de combustível e os tubos de abastecimento (David; Kopac, 2023).

A corrosão e compatibilidade de materiais também foram identificadas em testes. Alguns biocombustíveis e seus subprodutos (por ex., metanol e certos bio-óleos) possuem propriedades higroscópicas ou solventes que aumentam o risco de ataque em selos, juntas e certas ligas. Esses subprodutos indesejáveis podem causar endurecimento ou inchaço de juntas elastoméricas e de borracha, bem como de outras peças importantes do motor, além de corrosão dos sistemas de armazenamento e distribuição de combustível (Greenvoyage, 2025). Por isso, operações de prova indicam auditorias de materiais e substituição de componentes críticos por materiais compatíveis quando necessário.

O armazenamento e logística de abastecimento também se mostram barreiras técnicas. Testes de abastecimento em grande escala (ex. abastecimento de metanol em Singapura) demonstraram que procedimentos de abastecimento, instrumentação (medição por medidores de fluxo de massa), e protocolos digitais precisam ser validados para cada combustível alternativo, sob pena de riscos operacionais e divergências na faturação. A experiência dos centros de descarbonização marítima tem enfatizado a importância de operar procedimentos padronizados para garantir segurança e rastreabilidade. Dado o potencial para uma maior adoção de biocombustíveis, a indústria naval precisará continuar a construir um banco de dados crucial para desenvolver as melhores práticas que orientem o desenvolvimento do uso de biocombustíveis (Greenvoyage, 2025).

3.4.2 Barreiras Técnicas, Econômicas, Políticas e Regulatórias

As barreiras técnicas para a adoção de biocombustíveis no transporte marítimo são substanciais e diversas. Uma das principais limitações é a infraestrutura de abastecimento onde muitos portos ainda não estão prontos para fornecer combustíveis renováveis em escala, o que exige investimentos elevados para adaptação de tanques, sistemas de medição e distribuição. Embora possa parecer assustador, muitas iniciativas já em andamento provam que o transporte marítimo com zero emissões pode ser alcançado e parcerias e colaboração não convencionais entre setores precisam ser exploradas mais a fundo (Economic, 2024).

Além disso, apesar de muitos biocombustíveis serem “*drop-in*”, ou seja, teoricamente compatíveis com motores existentes a compatibilidade real é complexa. Segundo um relatório do Subcomitê de Combustíveis Marítimo, há preocupações com estabilidade oxidativa, corrosão e degradação quando os biocombustíveis são armazenados por longos períodos em

navios ou terminais, onde tendem a oxidar e degradar, em alguns meses, durante o armazenamento (Souza, 2022). Esses riscos técnicos podem afetar sistemas de injeção, filtragem, bombas e outros componentes, gerando custos operacionais adicionais para garantir segurança e confiabilidade.

A logística também se configura como barreira, pois a cadeia de suprimento para biocombustíveis (produção, transporte, estocagem) não está tão madura quanto a dos combustíveis fósseis. Segundo a Lloyd's Register (LR), a disponibilidade de matéria-prima para biocombustíveis marinhos é limitada e há forte concorrência de outros setores (como a aviação), o que dificulta a escala de produção e o abastecimento consistente. O relatório afirma que os principais desafios para a implantação em larga escala são a disponibilidade e a competição por demanda de outros setores de transporte, incluindo aviação, e o investimento em capacidade de produção de biocombustíveis que será necessário para atender à crescente demanda do setor de transporte (Lloyd's Register, 2024). Isso significa que, mesmo com motores compatíveis e infraestrutura, a incerteza no fornecimento logístico pode frear a implementação.

Portanto, para superar essas barreiras técnicas é necessário um esforço conjunto, de adaptação de portos, desenvolvimento de padrões operacionais, testes de compatibilidade em motores reais e criação de cadeias logísticas robustas. Sem esse suporte, muitos biocombustíveis renováveis podem permanecer restritos a pequenos projetos pilotos.

As barreiras econômicas para adoção de biocombustíveis no setor marítimo também são significativas. O relatório da Lloyd's Register e outros líderes do conhecimento em transporte marítimo em temas que incluem as características e considerações operacionais dos biocombustíveis, fatores regulatórios para a adoção de biocombustíveis, considerações tecnológicas, qualidade e disponibilidade de combustíveis e testes de biocombustíveis no transporte marítimo (Lloyd's Register, 2024). Custo inicial de produção, especialmente para biocombustíveis avançados, aliado à volatilidade dos preços de matéria-prima e frete, torna o investimento arriscado para muitos armadores.

Outra barreira econômica fundamental está no investimento inicial, atualizar a infraestrutura (tanques, sistemas de abastecimento), adaptar navios ou instalar equipamentos especializados pode demandar capital alto. A fragmentação da indústria (grande número de proprietários de navios versus locadores) também reduz o incentivo para esses investimentos, já que os custos são altos e os benefícios (como menor emissão ou reputação verde) podem demorar para se materializar. Além disso, existe o risco de volatilidade da oferta e do preço da matéria-prima biológica conforme apontado pela Lloyd's Register a concorrência por matéria-prima com outros setores (como aviação ou indústria química) pode elevar os preços e tornar

alguns biocombustíveis menos competitivos. (Lloyd's Register, 2024). Em suma, a transição para biocombustíveis requer uma estrutura de financiamento robusta, políticas de apoio (subvenções, créditos de carbono) e estratégias de mitigação de risco para que os projetos sejam economicamente viáveis e atraentes para os operadores marítimos.

Do ponto de vista político e regulatório, a adoção de biocombustíveis enfrenta desafios consideráveis. Por um lado, há diferenças entre países em suas políticas de incentivo ou regulação de combustíveis marítimos. Isso gera um ambiente de incerteza para empresas que operam globalmente, já que a base regulatória pode variar fortemente de uma jurisdição para outra. Segundo a Agência Câmara de Notícias (2025) a descarbonização da navegação marítima é tratada de forma interministerial para fins de novas inclusões na Política Nacional de Biocombustíveis e estudos sobre escala de produção e investimentos para adaptação da infraestrutura portuária (Câmara dos deputados, 2025).

Também há uma dependência significativa de políticas de apoio de subsídios, incentivos fiscais, créditos de carbono para viabilizar economicamente os biocombustíveis marítimos. O World Economic Forum destaca que, sem políticas específicas de suporte, muitos projetos de combustíveis verdes marítimos não conseguirão superar as barreiras de custo e escala. Essas barreiras mostram o risco de transição retardada se parcerias na cadeia de valor e modelos de negócios com compartilhamento de custos e riscos não forem desbloqueados (Economic, 2024). Portanto, a transição para biocombustíveis marítimos depende não apenas de avanços tecnológicos, mas também de um esforço regulatório coordenado, com normas estáveis, incentivos econômicos e harmonização entre nações, para reduzir a incerteza política e permitir investimentos sustentáveis.

3.4.3 Oportunidades para o Brasil e a América Latina

A América Latina, e especialmente o Brasil, apresenta um conjunto amplo de oportunidades para consolidar-se como protagonista global na produção, no uso e na exportação de biocombustíveis marítimos. Esses potenciais decorrem de fatores estruturais, como abundância de biomassa, expertise histórica em biocombustíveis, capacidade industrial instalada, políticas recentes de transição energética e crescente demanda global por combustíveis renováveis para o setor marítimo.

A primeira grande oportunidade para a região se dá na alta disponibilidade de biomassa sustentável. O Brasil possui uma das maiores capacidades de produção de biocombustíveis do mundo, com cadeias consolidadas de soja, cana-de-açúcar, etanol, biodiesel, HVO e

bioquerosene. Segundo Nota Técnica da *EPE* (Empresa de Pesquisa Energética), publicada em 2025, o país tem potencial técnico para aumentar significativamente a oferta de biocombustíveis para setores difíceis de descarbonizar, como a navegação marítima e fluvial, uma vez que dispõe de matéria-prima abundante e logística de produção já desenvolvida. O Brasil vem consolidando seu potencial para ser um dos protagonistas globais na produção de energia sustentável e, em especial, na produção de biocombustíveis. O arcabouço político e regulatório atualmente em construção reforça o compromisso do País em se afirmar como uma potência no setor, aliando a disponibilidade de recursos naturais, expertise técnica e responsabilidade ambiental. (Executiva, 2025)

Outra oportunidade estratégica é a infraestrutura industrial existente. América Latina, e em especial o Brasil, já possui refinarias, plantas de etanol, instalações de HVO e ampla rede de biodiesel, o que facilita a adaptação para formulação e fornecimento de combustíveis marítimos renováveis. O Brasil também se destaca por sua capacidade de liderar pilotos operacionais. Em 2023 e 2024, Petrobras, Vibra, Transpetro e parceiros privados conduziram testes reais com combustíveis renováveis em navios de cabotagem e rebocadores experiências que demonstram a viabilidade prática de blends com 24% a 30% de biodiesel, além de testes experimentais com biodiesel puro (B100) autorizados pela ANP. Essas iniciativas posicionam o Brasil como referência operacional na América Latina, ampliando sua visibilidade internacional na descarbonização marítima (Vibra, 2025).

Além disso, a região tem grande oportunidade na produção e exportação de e-combustíveis, como e-metanol e e-diesel, representando um avanço significativo na busca por alternativas energéticas sustentáveis, uma vez que esses combustíveis são produzidos a partir de fontes renováveis. Países latino-americanos possuem vastos recursos renováveis (solar, eólica, hídrica e biomassa) capazes de gerar hidrogênio verde a preços competitivos. Segundo a IRENA (2023) a América Latina, particularmente o Chile, o Brasil e a Argentina, poderá ser responsáveis por quase 6 milhões de toneladas da produção desses biocombustíveis (Irena, 2023).

Do ponto de vista comercial, há também forte oportunidade na integração econômica com a cadeia global de envio. O mercado internacional de transporte marítimo está pressionado por regulamentos como o *FuelEU Maritime* adota uma abordagem baseada em objetivos e tecnologicamente neutra, permitindo inovação e o desenvolvimento de novas tecnologias de combustível para atender às necessidades futuras, além de oferecer aos operadores a liberdade de decidir quais usar com base em perfis específicos de navio ou operação e o *EU ETS*, que exigem combustíveis limpos a partir de 2025. Isso cria demanda por fornecedores confiáveis

de biocombustíveis sustentáveis e a América Latina pode suprir parte dessa demanda diante do aumento de consumo de combustíveis alternativos na Europa e na Ásia (Redução das emissões..., 2023).

Finalmente, há uma oportunidade Política importante, o Brasil ganhou protagonismo internacional em 2025 ao assumir a liderança do debate global sobre combustíveis sustentáveis no G20, com propostas ligadas à descarbonização do transporte marítimo e incentivo à bioeconomia. Segundo reportagem da Câmara dos Deputados (2025), o governo brasileiro tem intenção de consolidar o país como referência mundial na produção e exportação de combustíveis de baixo carbono (Câmara dos Deputados, 2025).

Essas condições tornam o Brasil e a América Latina regiões com enorme potencial para se firmarem como centros estratégicos de combustíveis marítimos verdes, fornecendo não somente biocombustíveis convencionais e avançados, mas também e-fuels, hidrogênio verde e soluções integradas de descarbonização para o setor oceânico global. A combinação de recursos naturais abundantes, capacidade industrial instalada, inovação em testes operacionais, políticas emergentes e posicionamento internacional coloca o Brasil e seus vizinhos latino-americanos em uma trajetória favorável para liderar uma nova economia marítima sustentável nas próximas décadas.

3.5 Perspectivas Futuras

3.5.1 Cenários projetados pela IMO

A IMO atualizou sua Estratégia de Redução de Emissões em 2023, estabelecendo meta é reduzir as emissões de gases de efeito estufa do transporte marítimo internacional o mais rápido possível e atingir emissões líquidas zero de gases de efeito estufa até ou por volta de 2050. Reduzir as emissões totais anuais de GEE do transporte marítimo internacional em pelo menos 20%, com o objetivo de atingir 30% até 2030, em comparação com 2008, reduzir as emissões totais anuais de GEE do transporte marítimo internacional em pelo menos 70%, com o objetivo de atingir 80% até 2040, em comparação com 2008. Essas metas tornam obrigatória a rápida integração de combustíveis de baixo carbono, medidas de eficiência e mecanismos de mercado que atribuam valor às reduções de GEE (Maritime, 2023).

A IMO também tem promovido instrumentos operacionais para incentivar a transição, como o Carbon Intensity Indicator (CII) e revisões do EEDI/SEEMP, além de planos para mecanismos de precificação ou instrumentos econômicos que possam entrar em vigor na

segunda metade da década (cenários dependentes de aprovações políticas adicionais). As implicações desses cenários são claras: para que o setor alcance os pontos de verificação de 2030 e 2040, é necessária uma adoção acelerada de combustíveis alternativos (incluindo biocombustíveis, biometanol, e-fuels e hidrogênio derivado de fontes renováveis) e a modernização rápida da frota.

Já na trajetória tecnológica esperada até 2030–2050 combina duas frentes principais a primeira está relacionada a escala e economia de produção de combustíveis renováveis (biocombustíveis avançados, e-fuels, biometanol, bio-LNG) e a segunda evolução está relacionada a propulsões alternativas (células a combustível, motores dual-fuel, amônia e hidrogênio). Relatórios recentes apontam que tecnologias de hidrogênio e e-fuels avançaram rapidamente em pesquisa e projetos-piloto, mas dependem fortemente da disponibilidade de eletricidade renovável barata e de cadeias de captura/uso de CO₂ para viabilizar e-fuels com baixa intensidade de carbono. A IRENA e relatórios técnicos sobre hidrogênio indicam que a redução de custos de eletrólise e a expansão de renováveis são fatores críticos (Irena, 2023).

Do ponto de vista prático, espera-se avanços em eletrolisadores de maior eficiência e menor custo, processos de síntese de e-fuels com captura de CO₂ integrada, combustíveis de segunda/terceira geração (microalgas, gaseificação de resíduos) em escala comercial e sistemas de monitoramento embarcados para otimização operacional baseada em dados (digitalização e AI para gestão de rota/velocidade). Esses avanços reduzirão custos unitários e incertezas técnicas, tornando viável a transição escalonada.

3.5.2 Mudanças estruturais e econômicas esperadas no setor marítimo

As políticas e tecnologias combinadas provocam mudanças estruturais na economia do envio. Espera-se maior integração entre produtores de energia renovável, refinarias/plantas de biocombustíveis, terminais portuários e armadores, formando cadeias de valor verticalizadas para garantir suprimento estável e contratos de longo prazo. Relatórios de previsão (Maritime Forecast to 2050, DNV) apontam aumento significativo da capacidade de consumo de combustíveis de baixo GHG até 2030, mas também ressaltam que a infraestrutura (abastecimento, armazenamento, logística portuária) precisa acompanhar esse crescimento ou será gargalo limitador. (Souza, 2022)

Economicamente, a transição deverá provocar aumento transitório de custos operacionais para armadores (combustíveis renováveis mais caros) mitigado por contratos de compra de longo prazo, subsídios e precificação de carbono, realocação de investimentos para

novas unidades de produção de combustíveis renováveis e infraestrutura de abastecimento, mudanças na competitividade por rota, rotas com acesso a combustíveis limpos e portos preparados se tornam mais atraentes e formação de novos mercados (crédito de combustíveis verdes, certificações, serviços de abastecimento verde). Previsões recentes da IEA e análises de mercado apontam que, dependendo de políticas de incentivo, o equilíbrio custo-benefício da substituição poderá ser atingido. Os próximos passos serão concordar com medidas de médio prazo para atingir os objetivos revisados, como padrões de intensidade de GEE ou uma taxa/recompensa sobre combustíveis (Iea, 2023).

3.5.3 Perspectivas para o Brasil e América Latina na transição energética

Para o Brasil e a América Latina, as perspectivas são promissoras, mas condicionadas a políticas públicas, investimentos em infraestrutura e coordenação regional. Vantagens comparativas incluem: grande disponibilidade de biomassa, experiência consolidada em biocombustíveis (etanol, biodiesel, HVO), recursos renováveis para hidrogênio verde (eólica, solar, hídrica) e capacidade industrial para escala produtiva. Relatórios regionais de IRENA reforçam o papel potencial da região como exportadora de combustíveis renováveis e derivados (hidrogênio verde, e-metanol) a preços competitivos, especialmente se houver coordenação para cadeias logísticas e certificação de sustentabilidade. A certificação desempenha um papel fundamental no crescente comércio de hidrogênio e seus derivados, servindo como garantia de conformidade com diversas normas e regulamentações. Esses certificados são cruciais para assegurar que os produtos atendam aos padrões de sustentabilidade (Aerial-motion, 2022).

Casos concretos, como os testes de blends e pilotos conduzidos por empresas brasileiras (Petrobras, Vibra, testes de B24/B30 e projetos-piloto de abastecimento), além de estudos de potencial pela EPE, indicam que o país pode viabilizar oferta regional de biocombustíveis marítimos já na década de 2020–2030, atendendo tanto ao mercado doméstico de cabotagem quanto a demandas de exportação para mercados regulados (UE, Ásia). A condição é que haja políticas de estímulo (incentivos fiscais, contratos de compra pública, garantias de volume) para reduzir o risco dos investidores. Muitas vezes, são concedidas isenções fiscais aos investidores (que normalmente têm permissão para operar em zonas econômicas especiais), reduzindo assim os benefícios fiscais do país anfitrião (Aerial-motion, 2022).

Em síntese, o cenário futuro combina risco e oportunidade se as metas da IMO e os avanços tecnológicos se confirmarem, o setor marítimo experimentará uma transformação profunda até 2050. Para o Brasil e a América Latina, a janela de oportunidade exige ação rápida para consolidar capacidade de produção, infraestrutura de abastecimento e regimes de certificação que garantam sustentabilidade e rastreabilidade, assegurando que a região seja participante ativo da cadeia global de combustíveis limpos e que capture valor econômico dessa transição.

4 METODOLOGIA

4.1 Caracterização Metodológica da Pesquisa

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de abordagem qualitativa, exploratória e descritiva, fundamentada em uma revisão bibliográfica sistemática. Essa abordagem foi escolhida porque permite reunir, avaliar e sintetizar evidências existentes sobre determinado tema, oferecendo uma visão abrangente e estruturada do conhecimento disponível. A pesquisa exploratória é apropriada quando há pouco conhecimento acumulado sobre determinado tema, como é o caso do uso de biocombustíveis na navegação marítima, um tema bem escasso para pesquisas. Já a abordagem qualitativa, busca interpretar os significados e compreender as interações humanas e institucionais que influenciam a realidade, contextos e discursos. O caráter descritivo manifesta-se na intenção de retratar e analisar as experiências práticas e as políticas regulatórias relacionadas aos combustíveis renováveis utilizados por embarcações comerciais e turísticas.

4.2 Seleção dos dados da Literatura

O desenvolvimento da revisão seguiu uma sequência de procedimentos: definição de descritores e palavras-chave, seleção das bases de dados, estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão e análise das informações coletadas. As buscas foram realizadas nas principais bases de dados científicas e técnicas, como Scielo, CAPES Periódicos, ScienceDirect, Scopus, Google Scholar e análise de notícias, além de repositórios institucionais da Organização Marítima Internacional, da Agência Internacional de Energia e da Agência Internacional de Energias Renováveis.

A coleta de dados foi realizada exclusivamente a partir de fontes seguras, abrangendo artigos científicos, teses, dissertações, relatórios técnicos, documentos oficiais, sites e publicações institucionais. Essa estratégia foi adotada porque o objetivo principal era analisar a literatura já existente e compreender as abordagens teóricas e práticas sobre o uso de biocombustíveis no transporte marítimo, como mostrado no histograma abaixo.

Figura 1- Seleção dos dados da literatura.



Fonte: Autoria própria (2025).

4.3 Análise e Tratamento dos Dados Bibliográfico

Os dados obtidos foram submetidos a um processo de triagem em etapas: inicialmente, analisaram-se títulos e palavras-chave como transporte marítimo, biocombustíveis, Brasil, descarbonização e energia renovável, em seguida, foram avaliados os resumos e, por fim, foi realizada a leitura completa dos textos mais relevantes para os objetivos do estudo. Após essa etapa, o material selecionado foi organizado em uma planilha de controle contendo informações sobre autor, título, ano de publicação, origem do documento, base de dados e principais resultados, tudo reservado em pastas. Essa sistematização permitiu organizar o conteúdo de forma eficiente e facilitar o processo de análise e chegar ao objetivo.

Após a coleta, realizou-se uma leitura exploratória e analítica dos materiais selecionados e o conteúdo classificado em cinco grandes eixos temáticos: conceitos e classificações de biocombustíveis, regulações internacionais, experiências e testes, barreiras e oportunidades e perspectivas futuras.

A análise e a interpretação dos dados constituíram uma das etapas mais importantes do trabalho, pois permitiram compreender de forma crítica o conteúdo coletado e relacioná-lo aos objetivos da pesquisa. A técnica utilizada foi a análise de conteúdo temática, que consiste em examinar e interpretar o material coletado a partir de categorias definidos previamente. O processo analítico foi dividido em três momentos principais, o primeiro consistiu na leitura e familiarização com os textos selecionados; o segundo envolveu a classificação das informações dentro dos eixos temáticos estabelecidos; e o terceiro compreendeu a interpretação dos dados, destacando convergências, divergências e padrões identificados na literatura.

Durante essa etapa, buscou-se integrar as informações coletadas, relacionando-as com o contexto global de descarbonização do transporte marítimo e com as metas internacionais de sustentabilidade. A análise foi conduzida de maneira crítica, procurando compreender os fatores que influenciam a adoção de biocombustíveis, bem como as barreiras e oportunidades que se apresentam nesse processo, os dados serão apresentados em quadros e tabela.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A busca inicial nas bases de dados resultou na identificação de 32 artigos relacionados ao tema, após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão previamente definidos, 18 artigos atenderam aos requisitos estabelecidos e foram selecionados para compor o corpo final da revisão bibliográfica.

Quadro 1- Análise dos trabalhos selecionados

N	Título do trabalho	Autor	Ano	Endereço /link de acesso
01	Diretrizes da OMI sobre a intensidade de GEE no ciclo de vida de combustíveis marítimos	Miyake, R.	2025	ScienceDirect
02	Estratégia da OMI de 2023 para a redução das emissões de gases de efeito estufa provenientes de navios	IMO	2023	IMO - International Maritime Organization
03	Mudanças no uso da terra decorrentes da expansão da cultura da cana-de-açúcar na região oeste do estado de São Paulo	Lourenzani, w. L.; caldas, m. M.	2014	Scielo
04	Política de biocombustíveis em Brasil, Índia e Estados Unidos Informações para a Aliança Global de Biocombustíveis	Frankl, P; Moorhouse, J.	2023	CAPES Periódicos
05	Análise técnico-econômica de biocombustíveis sustentáveis para transporte marítimo	Mustakim, A.	2025	ScienceDirect

Continuação...

Quadro 1- Análise dos trabalhos selecionados

06	Melhorando a compatibilidade de motores diesel marítimos com combustíveis sustentáveis: principais fatores e ajustes	Damian, L.	2025	Scopus
07	Avaliação do ciclo de vida de sistemas de bioenergia: estado da arte e desafios futuros	Cherubin, F.; Strømman, A. H.	2011	ScienceDirect
08	Estudos sobre o desempenho, combustão e emissões de biocombustíveis híbridos em condições paramétricas	Ananthakumar, S., Barathiraja, S.	2025	Google Scholar
09	Moldando a sustentabilidade internacional cadeias de valor do hidrogênio	Lipponer, A. k.; Bianco, E.; Van, V, B, A.	2024	IRENA
10	Tracking the Propensity of Biofuels Degradation Across the Maritime Supply Chain	Thepsithar, P.; Kuttan, S. C.	2025	CAPES Periódicos
11	Avaliação técnico-econômica e ambiental de biocombustíveis marítimos	Souza, L. C.	2022	CAPES Periódicos
12	Desenvolvimento de biocombustíveis como combustíveis marítimos de baixa viscosidade com componentes ecologicamente corretos	Eremeeva, A. M.	2025	Scopus

Continuação...

Quadro 1- Análise dos trabalhos selecionados

13	Tecnologias de ponta: inovações em biocombustíveis em sistemas de propulsão marítima para reduzir as emissões de carbono negro	Manikandan, S.	2025	ScienceDirect
14	Avaliação econômica e ambiental da viabilidade de biocombustíveis à base de éster metílico de ácido graxo e óleo vegetal hidrotratado para futuros motores marítimos	Oloruntobi, O.	2025	ScienceDirect
15	Avaliação do papel do transporte marítimo de curta distância e dos portos nas emissões marítimas do poço à esteira	Mustakim, A.	2025	CAPES Periódicos
16	Eucalipto e capim elefante: características e potencial produtivo de biomassa	Silva, E.	2010	Google Scholar
17	Biocombustíveis no transporte	Sekkesæter, Ø.; Ovrum, E.; Horschig, T.; Henriksen, E.; Heggen, S	2025	Scopus
18	A hora do biometano no Brasil	Teixeira, C. A. N.; Costa, R. C.; Mendes, A. P. A.; Rocio, M. A. R.	2024	Google Scholar

Conclusão.

Fonte: Autoria própria (2025).

Foram lidos 18 artigos completos, os quais forneceram uma base sólida para a análise dos dados e a construção dos resultados relacionados ao uso de biocombustíveis no setor marítimo. Esses artigos abordaram uma diversidade de temas, como a viabilidade técnica, os

impactos ambientais, as barreiras econômicas e a perspectiva de transição energética no transporte marítimo. A seguir, discutiremos como cada um dos trabalhos encontrados contribuiu para a análise da pesquisa e como a produção de artigos variou ao longo dos anos.

Nos últimos anos, o ano de maior produção de artigos foi 2025, refletindo a crescente relevância do tema no contexto das metas globais de descarbonização, especialmente após eventos importantes como a COP 30 e as iniciativas da IMO (Organização Marítima Internacional). O aumento no número de publicações nesse ano reflete o fortalecimento do debate sobre a transição energética no setor marítimo, impulsionada por uma crescente demanda por soluções sustentáveis e pela necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes do transporte marítimo.

Embora o ano de 2025 tenha sido o período com maior produção de artigos, os anos anteriores, como 2020 a 2022, apresentaram uma produção menor. Durante esse período, o foco da pesquisa estava em biocombustíveis mais tradicionais, como o biodiesel e o bioetanol, e nas avaliações de impacto ambiental desses combustíveis no setor marítimo. Nesse intervalo, os estudos se concentraram principalmente na eficiência e potencial de redução de emissões desses biocombustíveis, bem como nos desafios operacionais e no uso de terras agrícolas para produção dessas fontes de energia renováveis.

Os artigos encontrados abordam de forma ampla os principais tipos de biocombustíveis que podem ser utilizados no transporte marítimo. Um dos primeiros trabalhos, como o de Souza (2022), focou em comparar o biodiesel como combustível renovável, abordando a redução das emissões de CO₂, além de discutir os custos operacionais associados ao uso do biodiesel no setor marítimo. O estudo de Ananthakumar (2025) trouxe uma análise detalhada do HVO (Óleo Vegetal Hidrotratado), discutindo sua produção a partir de óleos vegetais não alimentares e sua capacidade de reduzir as emissões de GEE em comparação com os combustíveis tradicionais.

Outro trabalho significativo foi o de (Damian, 2025), que tratou dos impactos ambientais e operacionais dos biocombustíveis no transporte marítimo, destacando a necessidade de integração de novas tecnologias e os testes realizados globalmente para verificar a viabilidade desses combustíveis. Esse estudo reforçou a importância da transição para biocombustíveis mais sustentáveis e da análise de cenários futuros no setor marítimo. No entanto, as barreiras econômicas e a alta competitividade de preços do LSFO em comparação com as alternativas renováveis ainda representam desafios.

A análise do biometanol, realizada por (Damian, 2025), revelou que, embora esse biocombustível tenha potencial de descarbonização significativo, ele ainda enfrenta desafios técnicos e elevados custos de produção. Esse resultado foi consistente com a análise do

bioetanol, cujo custo de produção também foi destacado, mas o bioetanol é considerado uma alternativa viável no curto prazo, especialmente em países com grande produção agrícola de cana-de-açúcar, como o Brasil.

O estudo sobre o biogás (Bio-LNG), conduzido por (Selvam, 2025), enfatizou o potencial do biogás como uma das alternativas mais sustentáveis e de baixo custo para o setor marítimo, especialmente por ser produzido a partir de resíduos orgânicos, o que contribui para a economia circular. Além disso, o uso de biogás em infraestruturas existentes facilita a transição para combustíveis mais limpos, com um impacto ambiental reduzido.

Por fim, os e-fuels, como e-metanol, e-diesel e e-GNL, apresentados em outro estudo de (Damian, 2025), foram destacados como alternativas promissoras para o futuro do transporte marítimo, com o potencial de descarbonizar o setor. Embora o custo de produção ainda seja elevado, o uso de eletricidade renovável na produção desses combustíveis abre um grande potencial de redução de emissões a longo prazo, à medida que as tecnologias de captura de carbono e eletrólise se tornam mais eficientes.

5.1 Processo de Produção dos Biocombustíveis

Comparando os biocombustíveis mais relevantes para o setor marítimo, considerando aspectos práticos e de desempenho, como facilidade de produção, adequação para uso em navios, e potencial de sustentabilidade, é possível entender qual biocombustível tem mais facilidade de implementação, menor custo, e maior potencial para se tornar o combustível dominante no setor.

A facilidade de produção de biocombustíveis no setor marítimo está diretamente ligada a vários fatores cruciais, como a tecnologia necessária, a disponibilidade de matérias-primas, a infraestrutura existente e a complexidade do processo de produção. Quanto mais simples for o processo de produção, e mais acessível e abundante for a matéria-prima, mais fácil será a implementação do biocombustível no setor. Além disso, a eficiência de produção também está relacionada à capacidade de escalabilidade da produção do combustível e à redução de custos para torná-lo competitivo no mercado.

Quadro 2-Facilidade de Produção dos Biocombustíveis

Biocombustível	Facilidade de Produção	Processo para obtenção do biocombustível
Biodiesel	Fácil	Processo simples (transesterificação), usa óleos vegetais ou resíduos alimentares.
HVO (Óleo Vegetal Hidrotratado)	Moderadamente difícil	Processo de hidrogenação mais complexo, exige infraestrutura mais avançada.
Biometanol	Difícil	Produção requer processos complexos de gaseificação e hidrólise.
Bioetanol	Moderadamente fácil	Produção a partir de biomassa agrícola é bem estabelecida.
Biogás (Bio-LNG)	Moderada	Processo eficiente a partir de resíduos orgânicos, mas requer infraestrutura de liquefação.
E-fuels (e-metanol, e-diesel, e-GNL)	Difícil	Produção exige tecnologias avançadas, como captura de CO ₂ e eletrólise.

Fonte: Autoria própria (2025).

Segundo quadro 2, o biodiesel é o biocombustível mais fácil de produzir, o que o torna uma das opções mais viáveis para implementação rápida no setor marítimo. Isso se deve principalmente ao processo simples de transesterificação, onde óleos vegetais ou gorduras animais são convertidos em biodiesel usando metanol e catalisadores. Esse processo já é bem estabelecido e utilizado em grande escala em várias indústrias ao redor do mundo. Além disso, o uso de resíduos alimentares e óleos vegetais residuais como matéria-prima torna a produção de biodiesel não é apenas mais barata, mas também ambientalmente mais sustentável, ao evitar a contaminação de água/solo e o uso de terras agrícolas para cultivo de matérias-primas. Navios também podem misturar o biodiesel com diesel convencional, o que facilita sua adaptação em frotas já existentes. Porém, embora o biodiesel tenha uma facilidade de produção elevada, ele pode ser menos eficiente em grandes quantidades e seu uso contínuo depende da disponibilidade de matéria-prima sustentável (Damian, 2025a).

O HVO (Óleo Vegetal Hidrotratado) é mais complexo de produzir, exigindo um processo de hidrogenação, no qual os óleos vegetais são tratados com hidrogênio em alta pressão para tornar possível a produção do combustível. O HVO é considerado uma opção mais limpa e eficiente do que o biodiesel, mas o processo de produção é mais avançado e caro, além de exigir uma infraestrutura mais robusta, como instalações de hidrogenação e refinarias especializadas. A infraestrutura do HVO exige infraestrutura especializada para a hidrogenação, o que limita a produção e a disponibilidade em larga escala. No entanto, já existem instalações comerciais de produção de HVO, principalmente na Europa e América do Norte. Portanto, o

HVO é uma boa alternativa para navegação de longo curso, navios maiores e grandes frotas, mas ainda enfrenta desafios em termos de custo e infraestrutura (Lloyd's Register, 2024).

A produção de biometanol envolve um processo tecnicamente desafiador e caro, como gaseificação de biomassa e síntese química, que requerem grandes quantidades de energia. A infraestrutura necessária para produzir biometanol em larga escala ainda não está amplamente estabelecida, o que limita sua escala de produção e viabilidade econômica no curto prazo. A infraestrutura de produção para biometanol ainda está em desenvolvimento, e sua adoção em larga escala depende de avançadas tecnologias de captura de carbono e eletrólise, o que torna sua produção mais cara e difícil. Portanto, o biometanol tem um potencial de redução de emissões, mas a complexidade do processo e o alto custo de produção tornam-no uma opção menos viável para o setor marítimo no curto prazo (Renó; Palacio; Lora, 2014).

O bioetanol é moderadamente fácil, produzido de forma relativamente simples através da fermentação de biomassa (como cana-de-açúcar ou milho). O bioetanol já é amplamente utilizado no transporte terrestre, especialmente no Brasil, onde a produção de etanol a partir de cana-de-açúcar é muito comum. A infraestrutura de produção de bioetanol já está bem estabelecida em países como o Brasil, onde o etanol é produzido em grande escala e utilizado para misturar com gasolina em automóveis. No entanto, para ser usado em navios, pode ser necessária alguma adaptação nos motores. Portanto, o bioetanol tem uma produção mais fácil e escala mais ampla, sendo uma boa opção para navegação curta e média. No entanto, sua eficiência energética não é tão alta quanto a do HVO ou biogás (Souza, 2012).

O biogás é moderadamente, produzido a partir de resíduos orgânicos, como restos de alimentos e lixo verde, e sua produção é relativamente simples. No entanto, para ser utilizado como Bio-LNG em navios, o biogás precisa passar pelo processo de liquefação, o que exige infraestrutura especializada. A infraestrutura de liquefação necessária para o uso de biogás em navios ainda é limitada, mas a tecnologia está em desenvolvimento e é cada vez mais viável para grandes frotas. Portanto, o biogás é uma opção promissora para navios de grande porte e rotas longas, especialmente se utilizado para aproveitar resíduos e reduzir emissões. No entanto, a infraestrutura de liquefação ainda limita sua adoção em grande escala (Masum, 2023).

Os e-fuels exigem tecnologias avançadas como eletrólise para produzir hidrogênio e captura de CO₂ para gerar combustíveis a partir de eletricidade renovável. Esses processos são caros e complexos, e ainda não estão prontos para produção em larga escala. Com uma infraestrutura necessária para captura de carbono e produção de hidrogênio em grande escala ainda está em fase de desenvolvimento, o que torna a produção de e-fuels cara e limitada. Portanto, os e-fuels têm um grande potencial de descarbonização a longo prazo, mas sua

produção complexa e alta tecnologia necessária tornam-nos menos viáveis para adoção em escala comercial no curto prazo (Carvalho, 2020).

A facilidade de produção é um critério crucial para determinar qual biocombustível tem maior potencial para se tornar o combustível predominante no setor marítimo. Com base nas análises, podemos concluir que o biodiesel é o mais fácil de produzir e tem grande escalabilidade devido ao processo simples e à abundância de matérias-primas. Ele é uma opção viável para rotas curtas e navios menores. O HVO é moderadamente difícil de produzir, mas oferece grande eficiência e menor impacto ambiental, o que o torna uma alternativa promissora para grandes navios e longas distâncias. O biogás (Bio-LNG) tem um processo de produção simples, mas requer infraestrutura de liquefação, o que o torna uma boa opção para grandes embarcações. Os e-fuels, embora promissores, ainda enfrentam desafios devido à complexidade e ao alto custo de produção, mas têm o maior potencial de descarbonização para o futuro.

5.2 Emissões de GEE (gCO₂eq/t.km)

A comparação das emissões de GEE é um dos parâmetros mais críticos para avaliar as alternativas mais sustentáveis para o setor, que busca diminuir sua pegada de carbono. Antes de avançar com os dados comparativos, é necessário entender um pouco mais sobre o LSFO (Low Sulfur Fuel Oil), ou óleo bunker de baixo teor de enxofre, como ele é utilizado e seu impacto ambiental.

O LSFO é um tipo de óleo combustível utilizado para a propulsão de embarcações. Em 2020, a Organização Marítima Internacional (IMO) implementou a regulamentação IMO 2020, que limita o teor máximo de enxofre nos combustíveis marítimos a 0,5%, uma redução substancial em relação ao limite anterior de 3,5%. O objetivo dessa medida foi reduzir a emissão de óxidos de enxofre (SO_x), que são responsáveis pela chuva ácida e têm um impacto significativo na saúde humana e no meio ambiente.

Embora o LSFO tenha um teor de enxofre reduzido, ele continua sendo um combustível fóssil com alto intensidade de carbono. O impacto ambiental do LSFO no setor marítimo é substancial, já que ele contribui com aproximadamente 2-3% das emissões globais de gases de efeito estufa, conforme estimativas da IMO. Em comparação com outras alternativas, o LSFO tem emissões de CO₂ de aproximadamente 105 gCO₂eq/t.km, um valor que ainda representa um desafio significativo para o setor no caminho da descarbonização (Mustakim; Mangan; Palacin, 2025),.

O valor gCO₂eq/t.km representa gramas de dióxido de carbono equivalente por tonelada de carga transportada por quilômetro. Essa unidade é crucial para medir o impacto de carbono dos combustíveis no setor de transporte marítimo, pois leva em conta não só o CO₂, mas também outros gases de efeito estufa, como o metano (CH₄) e os óxidos de nitrogênio (NO_x). Esses gases são convertidos para sua equivalência em CO₂, permitindo uma comparação uniforme entre os impactos ambientais de diferentes combustíveis. A utilização de gCO₂eq/t.km facilita a análise do impacto ambiental de diferentes combustíveis, permitindo que o setor marítimo avalie de forma clara como suas opções de combustível contribuem para as mudanças climáticas. Menores valores de gCO₂eq/t.km indicam combustíveis mais sustentáveis, com menor impacto na emissão de gases de efeito estufa (Ananthakumar; Barathiraja, 2025a).

Uma comparação entre os biocombustíveis e o óleo bunker de baixo teor de enxofre (LSFO) é apresentada na Tabela 1. Esse combustível é amplamente utilizado no setor marítimo devido ao seu custo relativamente baixo e à sua disponibilidade. No entanto, ele apresenta um impacto ambiental significativo, especialmente em relação às emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Tabela 1- Emissões de GEE (gCO₂eq/t.km)

Biocombustível	Emissões de GEE (gCO₂eq/t.km)	LSFO (105 gCO₂eq/t.km)
Biodiesel	100 gCO ₂ eq/t.km	5 gCO ₂ eq/t.km a menos
HVO (Óleo Vegetal Hidrotratado)	50 gCO ₂ eq/t.km	55 gCO ₂ eq/t.km a menos
Biometanol	-	-
Bioetanol	90 gCO ₂ eq/t.km	15 gCO ₂ eq/t.km a menos
Biogás (Bio-LNG)	70 gCO ₂ eq/t.km	35 gCO ₂ eq/t.km a menos
E-fuels (e-metanol, e- diesel, e-GNL)	60 gCO ₂ eq/t.km	45 gCO ₂ eq/t.km a menos

Fonte: Autoria própria (2025).

A tabela 1 apresenta os biocombustíveis como o biodiesel que apresenta 100 gCO₂eq/t.km, o que significa que, em comparação com o LSFO, ele tem 5 gCO₂eq/t.km a menos de emissões. Isso ocorre devido ao processo de transesterificação, onde óleos vegetais são convertidos em biodiesel, utilizando catalisadores e metanol. Esse processo exige uma quantidade considerável de energia e o uso de matérias-primas agrícolas pode resultar em

emissões indiretas durante o cultivo, como o uso de fertilizantes e o desmatamento para abrir novas áreas de cultivo. Biodiesel está em pauta, apesar das emissões mais altas, oferece uma redução de emissões a longo prazo devido ao seu ciclo de vida renovável. Embora as emissões do biodiesel ainda sejam ligeiramente menores que as LSFO, ele é considerado uma alternativa renovável e sustentável, que pode ser produzido de forma eficiente a partir de óleos vegetais residuais ou restos de alimentos. O biodiesel é uma das opções de transição energética no setor marítimo, contribuindo para a redução geral das emissões de GEE (Damian, 2025a).

O HVO apresenta 50 gCO₂eq/t.km, o que significa uma redução de 55 gCO₂eq/t.km a menos nas emissões de GEE em comparação com o LSFO. Esse biocombustível é produzido a partir de óleos vegetais, não alimentares ou resíduos agrícolas, passando por um processo de hidrogenação. O HVO tem a vantagem de ser quase idêntico ao diesel fóssil em termos de propriedades físicas, o que permite seu uso em infraestruturas existentes sem a necessidade de grandes modificações. O HVO apresenta uma redução significativa nas emissões de GEE e pode ser uma das alternativas mais sustentáveis para o transporte marítimo, especialmente quando produzido a partir de resíduos agrícolas. Sua produção utiliza menos energia e gera menos compostos aromáticos, o que melhora a eficiência de queima e reduz as emissões. Isso o torna uma das opções mais promissoras no caminho para a descarbonização do setor, com uma das matérias primas o óleo de soja custando 852,41 USD/t; o óleo de palma 763,58 USD/t e de menor valor que é a palha de cana 20,25 USD/t (bs) sem nenhuma umidade (Cesilla; Souza, 2022).

O bioetanol apresenta 90 gCO₂eq/t.km, resultando em uma redução de 15 gCO₂eq/t.km em relação ao LSFO. Ele é amplamente utilizado no Brasil, principalmente a partir da cana-de-açúcar, sendo uma das alternativas mais populares de biocombustível no setor de transporte. O bioetanol tem uma pegada de carbono menor do que o LSFO e pode ser produzido em grande escala no Brasil, onde a produção de cana-de-açúcar é abundante. Além disso, o bioetanol pode ser utilizado em motores existentes e é uma das alternativas mais viáveis no curto prazo, especialmente em países com alta produção agrícola de cana-de-açúcar, no entanto, a produção de etanol está sujeita à sazonalidade, uma vez que a colheita da cana-de-açúcar ocorre em determinados períodos do ano, o que pode influenciar a disponibilidade e os preços do etanol. A sazonalidade pode impactar a oferta, com períodos de maior produção durante a safra e menor produção na entressafra (Mustakim; Mangan; Palacin, 2025).

O biogás (ou Bio-LNG) tem 70 gCO₂eq/t.km, representando uma redução de 35 gCO₂eq/t.km nas emissões de GEE em comparação com o LSFO. O biogás é uma das alternativas mais sustentáveis, pois é produzido a partir de resíduos orgânicos e lixo verde,

aproveitando subprodutos que, de outra forma, seriam descartados. O biogás tem um grande potencial de aproveitamento de resíduos e apresenta uma pegada de carbono muito baixa. Sua produção não só reduz as emissões de GEE, mas também contribui para a economia circular, utilizando resíduos orgânicos. Além disso, o Bio-LNG pode ser utilizado em infraestruturas existentes, reduzindo os custos de adaptação no setor (Executiva, 2025).

Os e-fuels, como e-metanol, e-diesel e e-GNL, apresentam 60 gCO₂eq/t.km, oferecendo uma redução de 45 gCO₂eq/t.km nas emissões de GEE em relação ao LSFO. Esses combustíveis são produzidos a partir de eletricidade renovável, o que significa que sua pegada de carbono é muito mais baixa do que a do LSFO. Os e-fuels são produzidos a partir de fontes de energia renovável, como a energia solar ou eólica, e têm o potencial de descarbonizar o setor marítimo. Embora os custos de produção ainda sejam elevados, os e-fuels oferecem uma das melhores soluções para a transição para um setor mais sustentável, especialmente quando as tecnologias de captura de carbono e eletrólise se tornarem mais acessíveis (Carvalho, 2020).

A análise das emissões de GEE de diferentes biocombustíveis em comparação com o LSFO mostra que, enquanto alguns biocombustíveis, como o biodiesel, ainda é considerado alternativas viáveis devido ao seu ciclo de vida renovável e ao potencial de melhoria tecnológica. Por outro lado, o HVO, o biogás (Bio-LNG) e os e-fuels oferecem reduções significativas nas emissões de GEE, tornando-os opções altamente sustentáveis para a transição energética no setor marítimo. O HVO se destaca como uma das alternativas mais sustentáveis, com uma redução de 55 gCO₂eq/t.km nas emissões de GEE, enquanto os e-fuels oferecem o maior potencial de descarbonização.

Esses resultados indicam que a transição para biocombustíveis sustentáveis no setor marítimo é possível, mas deve ser feita com consideração dos custos de produção e da infraestrutura necessária para apoiar essas novas fontes de energia.

5.2.1 Potencial de Sustentabilidade

A sustentabilidade de um biocombustível é um critério fundamental para avaliar o seu impacto ambiental a longo prazo, especialmente no setor marítimo, que está sob crescente pressão para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE). O potencial de sustentabilidade de um biocombustível depende não apenas da redução de emissões durante sua produção e uso, mas também de fatores como o uso de recursos naturais, a competição com

alimentos, o desmatamento e a utilização de resíduos. Vamos expandir cada biocombustível discutido anteriormente e avaliar em maior profundidade seu potencial de sustentabilidade.

Quadro 3- Potencial de Sustentabilidade

Biocombustível	Potencial de Sustentabilidade
Biodiesel	Moderado
HVO (Óleo Vegetal Hidrotratado)	Alto
Biometanol	Moderado
Bioetanol	Moderado
Biogás (Bio-LNG)	Alto
E-fuels (e-metanol, e-diesel, e-GNL)	Alto

Fonte: Autoria própria (2025).

Com base nos 18 artigos lidos, o potencial de sustentabilidade dos biocombustíveis foi classificado como alto para o HVO, o biogás (Bio-LNG) e os e-fuels, devido à sua redução significativa de emissões e compatibilidade com infraestruturas existentes. O biometanol, o biodiesel e o bioetanol apresentaram um potencial moderado, principalmente devido ao impacto relacionado ao uso da terra e ao custo de produção mais elevado, mas ainda são considerados alternativas válidas para a transição energética do setor marítimo. Com base no Quadro 3 o biodiesel tem um potencial moderado de sustentabilidade porque sua produção depende de culturas agrícolas como soja, canola e palma. O uso dessas culturas alimentares pode gerar impactos indiretos como desmatamento, uso excessivo de terras agrícolas e emissões associadas ao cultivo (uso de fertilizantes e pesticidas). No entanto, ao utilizar resíduos de óleos vegetais e restos de alimentos, o impacto ambiental pode ser minimizado. O biodiesel também ajuda na economia circular, aproveitando materiais que, de outra forma, seriam descartados. Alternativas sustentáveis para o biodiesel, pode ser produzido a partir de óleos residuais ou culturas não alimentares (como algas) oferece um potencial mais sustentável, já que não compete com alimentos e ajuda a reduzir a pressão sobre os ecossistemas naturais (Pinho; Suarez, *[S.d.]*).

O HVO tem um alto potencial de sustentabilidade, pois é produzido a partir de óleos vegetais não alimentares ou resíduos de gordura animal. Isso evita a competição com alimentos e ajuda a reduzir os impactos ambientais negativos. Além disso, o HVO apresenta baixíssimas

emissões de GEE e menor emissão de material particulado durante sua queima. A produção de HVO utiliza tecnologia de hidrogenação para criar um combustível mais limpo e eficiente do que o biodiesel tradicional. O HVO também pode ser produzido de forma sustentável, com o uso de resíduos de óleos vegetais ou gorduras de fontes não alimentares, o que reduz os impactos sobre terras agrícolas e a segurança alimentar. Além disso, a infraestrutura existente de refinarias de petróleo pode ser facilmente adaptada para a produção de HVO, tornando-o uma alternativa viável e escalável para o setor marítimo. Com um potencial alto o HVO é uma das opções mais sustentáveis atualmente, especialmente em relação ao uso eficiente de resíduos e à redução das emissões de GEE (Santos, 2024).

O biometanol apresenta um potencial moderado de sustentabilidade, pois pode ser produzido a partir de biomassa não comestível, como resíduos agrícolas ou florestais, evitando a competição com alimentos. No entanto, o processo de gaseificação e hidrólise da biomassa requer grandes quantidades de energia, o que pode resultar em emissões indiretas de CO₂. A produção de biometanol ainda não é amplamente escala em comparação com o biodiesel ou o HVO, mas tem o potencial de ser mais sustentável se associado a tecnologias de captura de carbono e ao uso de energia renovável. Com desafios, o biometanol é mais caro e energeticamente intensiva. A escalabilidade de sua produção ainda enfrenta desafios tecnológicos, o que limita a sua viabilidade em larga escala (Cesilla; Souza, 2022).

O bioetanol tem um potencial moderado de sustentabilidade, principalmente devido à sua produção a partir de biomassa agrícola. Embora o bioetanol produzido a partir de cana-de-açúcar seja eficiente em termos de redução de emissões e tenha uma infraestrutura consolidada no Brasil, o uso de culturas alimentares para produzir bioetanol pode causar problemas de sustentabilidade, como a competição com alimentos e a alteração do uso da terra. No entanto, a produção de bioetanol a partir de resíduos agrícolas pode mitigar esses impactos e tornar a produção mais sustentável. Com alternativas sustentáveis se o bioetanol for produzido a partir de biomassa não alimentável, como resíduos de madeira ou palha, o impacto sobre a segurança alimentar pode ser minimizado. No entanto, a eficiência energética do bioetanol não é tão alta quanto a do HVO ou dos e-fuels (Souza, 2022).

O biogás (Bio-LNG) tem um alto potencial de sustentabilidade porque é produzido a partir de resíduos orgânicos, como restos de alimentos, lixo verde, resíduos agrícolas e lixo doméstico. Sua produção ajuda a reduzir a quantidade de resíduos enviados para aterros, promovendo a economia circular. Além disso, a queima de biogás resulta em menores emissões de GEE do que os combustíveis fósseis, já que o metano (CH₄) liberado pelos resíduos é capturado e usado como combustível. Com benefícios onde o biogás contribui

significativamente para a redução das emissões de GEE, aproveitando resíduos que de outra forma seriam descartados. Além disso, o Bio-LNG pode ser utilizado em motores existentes, tornando-o uma alternativa viável sem a necessidade de grandes modificações nos sistemas de propulsão marítima. O biogás é uma das alternativas mais sustentáveis, com grande potencial de redução de emissões e aproveitamento de resíduos (Nikolay, 2024).

Os e-fuels são produzidos a partir de eletricidade renovável, captura de CO₂ e eletrólise, um processo que é muito eficiente em termos de descarbonização. Os e-fuels têm grande potencial de sustentabilidade, pois são produzidos a partir de fontes de energia limpa, e seu impacto ambiental pode ser muito baixo, especialmente quando eletricidade renovável é utilizada. Com potencial de descarbonização os e-fuels têm o maior potencial de descarbonização entre todos os biocombustíveis, uma vez que a energia renovável é usada para sua produção. A produção de e-fuels é quase livre de emissões de CO₂, especialmente quando captura de carbono e eletrólise são realizadas com energia solar ou eólica. Mas enfrenta desafios, onde a principal dificuldade dos e-fuels é o alto custo de produção e a infraestrutura necessária, que são caros e ainda estão em desenvolvimento. O processo de captura de CO₂ e a eletrólise ainda não são viáveis em grande escala (Carvalho, 2020).

A sustentabilidade de um biocombustível no setor marítimo depende de vários fatores, incluindo a origem da matéria-prima, o processo de produção e a infraestrutura necessária. Com base na análise de potencial de sustentabilidade o HVO e o biogás (Bio-LNG) apresentam o maior potencial de sustentabilidade, já que são produzidos de forma sustentável a partir de resíduos e oferecem redução significativa nas emissões de GEE. Os e-fuels têm potencial de descarbonização elevado, mas ainda enfrentam altos custos de produção e uma infraestrutura de captura de CO₂ ainda em fase de desenvolvimento. O biodiesel e o bioetanol têm um potencial moderado, já que dependem de culturas agrícolas, o que pode gerar impactos ambientais indiretos, mas sua produção a partir de resíduos pode torná-los mais sustentáveis. Essas alternativas têm o potencial de melhorar significativamente a sustentabilidade do setor marítimo, mas a adoção em larga escala dependerá da tecnologia e da infraestrutura necessária, além do custo de produção.

5.2.2 Adequação para Navios

A adequação para uso em navios de um biocombustível depende de vários fatores, como a compatibilidade com motores existentes, a facilidade de adaptação às infraestruturas de

combustíveis e o desempenho do biocombustível em diferentes tipos de embarcações e rotas. Abaixo, apresento a adequação de cada biocombustível para o uso no setor marítimo.

Quadro 4- Adequação para Navios

Biocombustível	Potencial de Sustentabilidade
Biodiesel	Boa (mas limitado a rotas curtas e navios menores)
HVO (Óleo Vegetal Hidrotratado)	Excelente para grandes navios e longos trajetos
Biometanol	Limitação em navegação de longo curso
Bioetanol	Viável, mas não ideal para longo curso
Biogás (Bio-LNG)	Boa opção para grandes embarcações e rotas longas
E-fuels (e-metanol, e-diesel, e-GNL)	Excelente para longos trajetos e grandes navios

Fonte: Autoria própria (2025).

A adequação dos biocombustíveis para o setor marítimo foi analisada a partir dos 18 artigos lidos. Cada artigo contribuiu para a avaliação de quais biocombustíveis são mais apropriados para o uso em embarcações, levando em consideração fatores como compatibilidade com motores existentes, eficiência operacional e facilidade de adaptação às infraestruturas portuárias. Conforme observado no Quadro 4, o biodiesel é uma opção viável para navios menores e rotas curtas devido à sua capacidade de ser misturado com diesel convencional. Esse biocombustível pode ser utilizado sem modificações substanciais nos motores, especialmente em embarcações de pequeno porte que operam em distâncias curtas. No entanto, sua eficiência energética em grandes distâncias é limitada, o que faz com que ele não seja a melhor escolha para longos trajetos (Ananthakumar; Barathiraja, 2025b).

O HVO é uma das melhores opções para navios grandes e longas distâncias. O HVO possui propriedades semelhantes ao diesel, o que permite que seja utilizado em motores existentes de grandes embarcações sem a necessidade de grandes modificações. Isso torna o HVO uma alternativa eficiente e escalável, especialmente para longos trajetos e grandes frotas de navios (Santos, 2025).

O biometanol apresenta limitações para navegação de longo curso. Isso ocorre porque ele requer infraestrutura especial e motores compatíveis, o que torna a adaptação mais cara e difícil. O biometanol é mais indicado para navios de menor porte ou rotas curtas, onde a infraestrutura necessária pode ser implementada mais facilmente (Cesilla; Souza, 2022)..

O bioetanol é viável para navios em rotas curtas, especialmente em países produtores de cana-de-açúcar, como o Brasil, onde a produção de etanol é amplamente estabelecida. No entanto, o bioetanol apresenta limitações em longos trajetos devido à menor eficiência energética em comparação com outros biocombustíveis como o HVO (Damian, 2025).

O biogás (Bio-LNG) é uma boa opção para grandes embarcações e rotas oceânicas, já que pode ser utilizado em motores de gás natural, que são comuns em várias frotas. Além disso, o biogás tem a vantagem de ser produzido a partir de resíduos orgânicos, como restos alimentares, lixo verde e resíduos agrícolas, o que o torna sustentável e ajuda a reduzir a quantidade de resíduos enviados para aterros.

Os e-fuels possuem um grande potencial de descarbonização e são muito compatíveis com sistemas de propulsão marítima, mas ainda exigem infraestrutura especializada, como captura de CO₂ e eletrólise. Embora sua tecnologia esteja em desenvolvimento, os e-fuels são promissores para o futuro, pois são produzidos a partir de eletricidade renovável e podem ser utilizados em grandes embarcações e para longos trajetos (Carvalho, 2020).

5.3 Vantagens e Desvantagens

Analisar as vantagens e desvantagens de cada biocombustível com base nos aspectos discutidos anteriormente. Essa comparação vai ajudar a entender qual biocombustível é mais viável para a redução das emissões de GEE e qual apresenta mais desafios para a implementação em larga escala no setor marítimo.

Quadro 5 - Vantagens e desvantagens dos biocombustíveis

Biocombustível	Vantagens	Desvantagens
Biodiesel	- Baixo custo de produção (1,50 USD/L). - Produção simples e bem estabelecida. - Boa adaptabilidade a sistemas existentes.	- Menos eficiente em longas distâncias. - Produzido a partir de culturas alimentares, o que pode afetar segurança alimentar. - Maior impacto ambiental em grandes quantidades.
HVO (Óleo Vegetal Hidrotratado)	- Baixas emissões de GEE. - Compatível com motores existentes. - Produzido a partir de resíduos não alimentares, o que evita impacto em alimentos.	- Custo elevado (2,00 USD/L). - Infraestrutura mais complexa e necessária para hidrogenação. - Escalabilidade limitada devido à disponibilidade limitada de matérias-primas não alimentares.

Continuação...

Quadro 5 - Vantagens e desvantagens dos biocombustíveis

Biometanol	- Redução significativa de GEE. - Produzido a partir de biomassa não comestível, o que reduz o impacto ambiental.	- Custo de produção elevado devido à complexidade do processo. - Infraestrutura especializada necessária para produção e adaptação de motores. - Escalabilidade limitada.
Bioetanol	- Produção bem estabelecida e de baixo custo. - Adaptável a motores existentes. - Alternativa renovável amplamente utilizada no Brasil e outros países produtores de cana-de-açúcar.	- Produzido a partir de culturas alimentares, o que pode afetar a segurança alimentar. - Menor eficiência energética em comparação com o HVO e biogás.
Biogás (Bio-LNG)	- Reduz significativamente as emissões de GEE. - Produzido a partir de resíduos orgânicos, contribuindo para a economia circular. - Eficiência energética alta.	- Infraestrutura de liquefação necessária. - Custo elevado de liquefação e armazenamento. - Disponibilidade de resíduos pode ser uma limitação em determinadas regiões.
E-fuels	- Potencial de descarbonização muito alto. - Compatível com motores existentes. - Produzido a partir de eletricidade renovável.	- Custo de produção elevado (3,00 USD/L). - Infraestrutura especializada necessária para captura de CO₂ e eletrólise. - Tecnologia ainda em desenvolvimento, o que limita sua adoção em larga escala.

Conclusão.

Fonte: Autoria própria (2025).

Observa-se no Quadro 5 como base, o biodiesel é a opção mais barata e fácil de produzir, mas sua eficiência limitada e o impacto ambiental devido ao uso de culturas alimentares o tornam mais adequado para rotas curtas e navios menores. HVO é uma alternativa eficiente e sustentável, especialmente para grandes embarcações e longas distâncias, mas o custo de produção mais alto e a necessidade de infraestrutura especializada limitam sua adoção em grande escala. Biometanol oferece potencial ambiental significativo, mas a complexidade do processo de produção e o alto custo tornam-no uma opção menos viável no curto prazo. Bioetanol é uma alternativa acessível e amplamente utilizada, mas o uso de culturas alimentares e sua menor eficiência energética o tornam menos adequado para grandes distâncias. Biogás (Bio-LNG) é uma das opções mais sustentáveis e competitivas, com potencial de redução de emissões, mas a infraestrutura de liquefação necessária limita sua adoção em grande escala. E-fuels oferecem o maior potencial de descarbonização, mas os custos elevados de produção e a

infraestrutura necessária ainda representam grandes desafios para sua adoção. Essa análise fornece uma visão clara das vantagens e desvantagens de cada biocombustível, ajudando a determinar qual é o mais adequado para diferentes tipos de embarcações e rotas, considerando viabilidade econômica, sustentabilidade ambiental e eficiência energética (Luiza Grillo Renó; Carlos Escobar Palacio; Eduardo Silva Lora, 2014).

Em síntese, os biocombustíveis relevantes para o setor naval formam um conjunto diversificado de soluções tecnológicas em diferentes estágios de maturidade. Cada tipo apresenta vantagens específicas, desafios próprios e níveis variados de compatibilidade com os motores e sistemas de abastecimento existentes. O biodiesel e o HVO oferecem alternativas imediatas de substituição parcial dos combustíveis fósseis, o biometanol e o bioetanol representam opções intermediárias de médio prazo, com alta viabilidade técnica; enquanto o Bio-LNG e os e-fuels se projetam como soluções de longo prazo, associadas à completa neutralidade de carbono.

O futuro do transporte marítimo dependerá, portanto, de uma combinação inteligente entre esses combustíveis, apoiada por políticas públicas, investimentos em pesquisa e desenvolvimento e cooperação internacional. A adoção progressiva dos biocombustíveis permitirá que o setor alcance padrões mais elevados de eficiência energética, sustentabilidade e competitividade, alinhando-se aos objetivos globais de mitigação das mudanças climáticas e de preservação dos oceanos.

5.4 Biocombustível mais adequado

A análise do biocombustível mais adequado para o transporte marítimo foi baseada em uma série de critérios extraídos de 18 artigos revisados. Foram considerados o processo de fabricação de cada biocombustível, sua dependência de matérias-primas e a complexidade do processo. Biocombustíveis como o HVO e o biogás (Bio-LNG) se destacam por suas fontes não alimentares, o que os torna mais sustentáveis, enquanto o biometanol exige processos mais complexos, aumentando o custo de produção.

Quadro 6- Biocombustível mais adequado

Biocombustível	Características de Produção	Emissões	Sustentabilidade	Adequação	Vantagens
HVO (Óleo Vegetal Hidrotratado)	Produzido a partir de óleos vegetais não alimentares e resíduos.	Redução de até 50% nas emissões de CO ₂ .	Alta, utiliza resíduos e não compete com alimentos.	Excelente para grandes navios e longos trajetos.	Alta eficiência, fácil adaptação aos motores existentes.

Continuação...

Quadro 6- Biocombustível mais adequado

Biogás (Bio-LNG)	Produzido a partir de resíduos orgânicos, como restos de alimentos e resíduos agrícolas. Processo de liquefação.	Redução de até 35% nas emissões de CO2.	Alta, aproveita resíduos e contribui para a economia circular.	Boa opção para grandes embarcações e rotas longas.	Custo reduzido, infraestrutura já existente para abastecimento.
Biodiesel	Produzido por transesterificação de óleos vegetais ou gorduras animais. Utiliza matérias-primas agrícolas.	Emissões 5% menores que o LSFO, mas depende de cultivo de matérias-primas.	Moderada, pode causar impactos indiretos relacionados ao uso da terra.	Boa para navios menores e rotas curtas.	Alternativa renovável e compatível com motores atuais.
Biometanol	Produzido por gaseificação e hidrólise de biomassa (resíduos florestais e agrícolas). Processo de conversão mais complexo.	15% mais emissões que o LSFO.	Moderada, depende da biomassa não comestível para maior sustentabilidade.	Limitação para navegação de longo curso.	Potencial significativo de descarbonização, mas mais caro.
Bioetanol	Produzido a partir de culturas agrícolas, como a cana-de-açúcar. Tecnologia já estabelecida em vários países.	Redução de 15% nas emissões de CO2.	Moderada, impacta o uso de terras agrícolas e pode afetar ecossistemas.	Viável para navios menores, não ideal para longos trajetos.	Produção em larga escala, especialmente no Brasil.
E-fuels (e-metanol, e-diesel, e-GNL)	Produzido a partir de eletricidade renovável (solar, eólica) por eletrólise e captura de CO2.	Redução de até 45% nas emissões de CO2.	Alta, dependendo da fonte de eletricidade renovável utilizada.	Excelente para longos trajetos e grandes navios.	Potencial de descarbonização, compatível com infraestruturas existentes.

Conclusão.

Fonte: Autoria própria (2025).

A redução das emissões de CO₂ é um critério essencial, já que a principal vantagem dos biocombustíveis é a descarbonização do setor. O HVO e os e-fuels apresentam as maiores reduções de emissões, enquanto o biometanol gera emissões superiores em comparação com o LSFO.

A sustentabilidade foi analisada a partir do uso de matérias-primas renováveis e da possibilidade de aproveitamento de resíduos. O HVO e o biogás (Bio-LNG) se destacam pelo uso de resíduos não alimentares e pela redução do impacto sobre a agricultura. Já o biodiesel e o bioetanol, embora renováveis, dependem mais de culturas agrícolas, o que pode gerar impactos indiretos como desmatamento e competição com a produção de alimentos.

A adequação ao setor marítimo foi avaliada pela compatibilidade com motores existentes e pela eficiência energética. O HVO é altamente adequado para grandes navios e longas distâncias, com baixa necessidade de modificações. O biogás (Bio-LNG) também é uma boa opção devido à infraestrutura já existente em muitos portos. O biometanol e o bioetanol, embora viáveis, apresentam limitações operacionais pela necessidade de infraestrutura adicional.

Considerando os benefícios gerais, o HVO e o biogás (Bio-LNG) se destacam como alternativas mais eficientes e sustentáveis, com reduções significativas de emissões e baixa complexidade operacional. Os e-fuels oferecem o maior potencial de descarbonização no futuro, especialmente à medida que tecnologias de eletrólise e captura de CO₂ se tornem mais acessíveis.

Com base na análise dos artigos revisados, o HVO e o biogás (Bio-LNG) emergem como as opções mais adequadas e sustentáveis para o transporte marítimo. O HVO se destaca pela redução significativa de emissões e pela compatibilidade com motores existentes, tornando-se uma alternativa promissora para grandes embarcações e longos trajetos. O biogás é vantajoso tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental, especialmente pela infraestrutura já disponível.

O biometanol, embora tenha grande potencial de descarbonização, ainda enfrenta desafios econômicos e logísticos para ampla implementação. Já os e-fuels, apesar do maior potencial futuro, exigem tecnologias avançadas e redução significativa de custos para competir com alternativas já existentes. E essa análise contribui para compreender qual biocombustível é mais adequado ao setor marítimo, considerando características operacionais, potencial de sustentabilidade e necessidades de infraestrutura.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O transporte marítimo desempenha um papel essencial no comércio internacional, sendo responsável por grande parte do escoamento de mercadorias globalmente. Contudo, esse setor permanece altamente dependente de combustíveis fósseis, que são a principal fonte de emissões de gases de efeito estufa (GEE). A Organização Marítima Internacional (OMI) apontou que o transporte marítimo é responsável por 2,8% das emissões globais de CO₂, o que torna este setor um alvo importante para ações de mitigação das mudanças climáticas. Nos últimos anos, a crescente pressão internacional, aliada à urgência em reduzir as emissões de carbono, levou organismos internacionais a estabelecerem metas rigorosas de descarbonização, promovendo a busca por alternativas energéticas sustentáveis. Nesse contexto, os biocombustíveis emergem como uma solução viável no curto e médio prazo, devido à sua capacidade de reduzir as emissões sem a necessidade de uma substituição imediata da frota mundial, além de serem compatíveis com motores e infraestruturas existentes.

A COP 30, realizada no Brasil, reafirmou o compromisso global com a redução de emissões e a transição para fontes de energia renováveis no setor energético, incluindo o transporte marítimo. Durante a conferência, foi discutido o papel dos biocombustíveis como uma das principais soluções para enfrentar o desafio das mudanças climáticas no transporte marítimo, destacando a importância da governança global, da inovação tecnológica e dos investimentos em infraestrutura. Além disso, a COP 30 consolidou os compromissos dos países em relação à descarbonização do setor, com especial foco na adaptação das embarcações e no uso de combustíveis renováveis.

Este trabalho, ao realizar uma revisão bibliográfica sistemática, abordou os principais tipos de biocombustíveis aplicáveis ao setor marítimo, como biodiesel, HVO (Óleo Vegetal Hidrotratado), biometanol, bioetanol, biogás (Bio-LNG) e e-fuels. A análise desses combustíveis revelou vantagens e desafios operacionais de cada um, com destaque para a redução das emissões de CO₂ e outros poluentes, que representam um avançado passo para o cumprimento das metas de descarbonização do setor. Além disso, foram exploradas as questões relacionadas à viabilidade técnica e econômica, apontando que, embora os biocombustíveis sejam mais caros em alguns casos, suas vantagens ambientais e seu potencial de descarbonização tornam-nos alternativas viáveis no longo prazo, especialmente para a transição energética no setor marítimo.

A revisão também permitiu identificar as principais barreiras à implementação dos biocombustíveis no setor marítimo. Entre as barreiras técnicas, destaca-se a necessidade de adaptação das embarcações e a infraestrutura de abastecimento limitada. Já as barreiras econômicas envolvem o alto custo de produção de alguns biocombustíveis, como o biometanol e os e-fuels, que ainda são mais caros em comparação com os combustíveis fósseis tradicionais. Além disso, as barreiras logísticas são significativas, uma vez que a infraestrutura de abastecimento global precisa ser expandida para atender a uma frota mundial que, na maioria dos casos, ainda utiliza combustíveis convencionais.

A análise do papel das políticas públicas e das regulações internacionais demonstrou que as metas de redução de emissões, como as estabelecidas pela IMO e pelos compromissos firmados na COP 30, têm um impacto significativo na promoção do uso de combustíveis alternativos no transporte marítimo. As políticas governamentais e os incentivos fiscais têm o poder de impulsionar a produção e o uso de biocombustíveis, tornando-os mais acessíveis e competitivos. A atuação do Brasil, com seu potencial para produzir biocombustíveis, sua experiência industrial e os avanços tecnológicos já alcançados, coloca o país em uma posição estratégica para liderar a produção de combustíveis renováveis para o setor marítimo.

Em síntese, os biocombustíveis se mostram como uma alternativa estratégica para a descarbonização do transporte marítimo. A viabilidade técnica, o potencial ambiental e as oportunidades econômicas associadas aos biocombustíveis tornam-nos uma solução promissora para o futuro do setor marítimo, especialmente para o Brasil e América Latina, que possuem condições favoráveis para se destacar nesse mercado. A transição para um setor marítimo mais sustentável é, portanto, uma realidade possível, mas que depende de iniciativas coordenadas entre os governos, indústria e pesquisa. Além disso, a fortalecida governança internacional, o desenvolvimento de novas tecnologias e o aumento dos investimentos são essenciais para garantir o sucesso dessa transição.

REFERÊNCIAS

- AB SURVEYORS. Marine Surveyors Espanha - **Plano de Gestão da Eficiência Energética de Navios Explicado**. Disponível em: <https://ab-surveyors.com/the-ship-energy-efficiency-management-plan-seemp-a-key-tool-for-sustainable-shipping?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 18 nov. 2025.
- AERIAL-MOTION. **Moldando a sustentabilidade internacional cadeias de valor do hidrogênio**. [S.l.: S.n.].
- AIRCLIM. AN3-2010.en.pt. set. 2010.
- ANANTHAKUMAR, S.; BARATHIRAJA, R. **Studies on the Performance, Combustion, and Emissions of Hybrid Biofuel under Parametric Conditions**. Journal of Environmental Nanotechnology, v. 14, n. 1, p. 523–537, 1 abr. 2025a.
- ANANTHAKUMAR, S.; BARATHIRAJA, R. **Studies on the Performance, Combustion, and Emissions of Hybrid Biofuel under Parametric Conditions**. Journal of Environmental Nanotechnology, v. 14, n. 1, p. 523–537, 1 abr. 2025b.
- BRASIL. M. DE M. E E. **O Programa**. Disponível em: <<https://antigo.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/acoes-e-programas/programas/biodiesel/o-programa>>. Acesso em: 5 nov. 2025.
- CÂMARA DOS DEPUTADO FONTE: AGÊNCIA CÂMARA DE NOTÍCIAS. **Governo quer acelerar a descarbonização da navegação marítima para cobrir lacuna da transição energética** - Notícias - Portal da Câmara dos Deputados. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/1143839-governo-quer-acelerar-a-descarbonizacao-da-navegacao-maritima-para-cobrir-lacuna-da-transicao-energetica/?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- CARVALHO, F. M. **Perspectivas de produção de combustíveis marítimos de emissão neutra de carbono no Brasil**. RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE 2020. Rio de Janeiro, 2020. Anais... Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP), 2020.
- CATIVA, R. et al. **Escola superior náutica infante d. Henrique departamento de engenharia marítima tese para obtenção do grau de mestre em engenharia de máquinas marítimas transição energética no transporte marítimo. Uma visão regulatória no contexto ecológico e estratégias para a sua**, novembro de 2024 LISBOA-PORTUGAL. [S.l.: S.n.].
- CENTRO de descarbonização marítima de Singapura conclui seu teste final de biocombustíveis marinhos | Reuters. Disponível em: <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/singapores-maritime-decarbonisation-centre-completes-its-final-marine-biofuels-2024-07-19/?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 20 nov. 2025b.
- CESILLA, Lucas; SOUZA, D. E. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS **Faculdade de Engenharia Mecânica**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://orcid.org/0000-0001-5141-1406>>.

CHERUBINI, Francesco; STRØMMAN, Anders Hammer. **Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges**. Bioresource Technology, jan. 2011.

DA SILVA, Evane; CARLOS, Dsc; ROCHA, Roberto. **Eucalipto e capim elefante: características e potencial produtivo de biomassa eucalyptus and elephant grass: characteristic and productive potential of biomass**. [S.l.: S.n.].

DAMIAN, Christopher Selvam *et al.* **Enhancing marine diesel engine compatibility with sustainable fuels: Key factors and adjustments**. Marine Pollution BulletinElsevier Ltd, , 1 jun. 2025a.

DAMIAN, Christopher Selvam *et al.* **Enhancing marine diesel engine compatibility with sustainable fuels: Key factors and adjustments**. Marine Pollution BulletinElsevier Ltd, , 1 jun. 2025b.

DAVID, Elena; KOPAC, Janez. **Survey on Antioxidants Used as Additives to Improve Biodiesel's Stability to Degradation through Oxidation**. MoleculesMultidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 dez. 2023.

DONG, Junjie *et al.* **A review of law and policy on decarbonization of shipping**. *Frontiers in Marine Science*Frontiers Media S.A., , 22 nov. 2022.

DUARTE, V. H.. **Meio Ambiente (Brasil)**. [S.l.: S.n.].

EREMEEVA, A. M. *et al.* **Development of Biofuel as Marine Low-viscosity Fuels with Environmentally Friendly Components**. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, v. 38, n. 2, p. 273–279, 1 fev. 2025.

EXECUTIVA, Coordenação *et al.* **NOTA TÉCNICA EPE/DPG/SDB/2024/06 Diretora de Estudos do Petróleo, Gás e Biocombustíveis Heloisa Borges Bastos Esteves Thiago Guilherme Ferreira Prado Técnica em Secretariado**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br><http://www.epe.gov.br>>.

GCMD. **Tracking The Propensity Of Biofuels Degradation Across The Maritime Supply Chain**. [S.l.: S.n.].

EXECUTIVE, T. M. **Estudo apoia argumentos crescentes para uso prolongado de misturas de biocombustíveis**. Disponível em: <https://maritime-executive.com/article/study-supports-growing-case-for-long-term-use-of-biofuel-blends?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 19 nov. 2025.

GREENVOYAGE. **Combustíveis marinhos alternativos: Mapeamento regulatório: GreenVoyage2050**. Disponível em: <https://greenvoyage2050.imo.org/alternative-marine-fuels-regulatory-mapping/?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 19 nov. 2025.

GUIA MARÍTIMO. **Vibra e Svitzer avançam na descarbonização com projeto de biodiesel para rebocadores - Guia Marítimo**. Disponível em: <<https://www.guamaritimo.com.br/noticias/embarcacoes/vibra-e-svitzer-avancam-na->>

descarbonizacao-com-projeto-de-biodiesel-para-rebocadores?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 20 nov. 2025.

HEMPEL. **O dilema do esfregão e o impacto de selecionar o revestimento ideal para o casco - Hempel**. Disponível em: <https://www.hempel.com/knowledge-center/technical-articles/the-scrubber-dilemma-and-the-impact?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 19 nov. 2025.

IEA **Transporte internacional - IEA**. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/transport/international-shipping?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 20 nov. 2025. INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. IMO 2020 – **cutting sulphur oxide emissions**. OMi, p. 2019–2020, 2020.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. IMO. **Anexo 1 projeto de resolução adotado em [7 de julho de 2023]**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <www.onlinedoctranslator.com>.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. IMO. **Breve História da IMO**. Disponível em: <<https://www.imo.org/en/about/historyofimo/pages/default.aspx>>. Acesso em: 18 nov. 2025.

IRENA. **Green hydrogen for sustainable industrial development: A policy toolkit for developing countries**. [S.l.: S.n.].

KIM, Mingyu *et al.* **Proposals on Effective Implementation of the Carbon Intensity Indication of Ships**. Journal of Marine Science and Engineering, v. 12, n. 11, 1 nov. 2024. KUMAR, Rohan *et al.* **Charting the course to cleaner shipping routes: emission inventory for Baltic Sea shipping and green fuel potential**. Carbon Management, v. 16, n. 1, 2025.

LLOYD'S REGISTER. **Desafios para a adoção de biocombustíveis no transporte marítimo | LR**. Disponível em: <https://www.lr.org/en/knowledge/press-room/press-listing/press-release/2024/feedstock-availability-and-aviation-demand-challenge-biofuel-adoption-in-shipping/?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 20 nov. 2025.

LOURENZANI, Wagner Luiz; CALDAS, Marcellus Marques. **Mudanças no uso da terra decorrentes da expansão da cultura da cana-de-açúcar na região oeste do estado de São Paulo**. Ciencia Rural, v. 44, n. 11, p. 1980–1987, 2014.

MASUM, Farhad H. *et al.* **Comparing Life-Cycle Emissions of Biofuels for Marine Applications: Hydrothermal Liquefaction of Wet Wastes, Pyrolysis of Wood, Fischer–Tropsch Synthesis of Landfill Gas, and Solvolysis of Wood**. Environmental Science & Technology, v. 57, n. 34, p. 12701–12712, 29 ago. 2023.

MIOLA, Apollonia *et al.* **JRC REFERÊNCIA RELATÓRIOS Regulamentação das emissões atmosféricas dos navios O estado da arte em metodologias, Tecnologias e opções de políticas**. 2010.

MUSTAKIM, Achmad; MANGAN, John; PALACIN, Roberto. **Assessing the role of short-sea shipping and ports in maritime well-to-wake emissions**. Marine Pollution Bulletin, v. 219, 1 out. 2025.

NELYUBOV, Dmitriy V. *et al.* **New Prospects of Waste Involvement in Marine Fuel Oil: Evolution of Composition and Requirements for Fuel with Sulfur Content up to 0.5%.** Journal of Marine Science and Engineering, v. 11, n. 7, 1 jul. 2023.

OLORUNTOBI, Olakunle *et al.* **Economic and environmental assessment of fatty-acid-methyl-ester and hydrotreated vegetable oil biofuels viability for future marine engines.** Bioresource Technology Reports, v. 30, 1 jun. 2025.

Redução das emissões de GEE - Combustível Regulamento Marítimo da UE - EMSA - Agência Europeia de Segurança Marítima. Disponível em: <https://www.emsa.europa.eu/reducing-emissions/fuel-eu-maritime-regulation.html?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 20 nov. 2025.

RENÓ, M. L. G.; PALACIO, J. C. E.; EDUARDO SILVA LORA, E. E. S. **A poligeração na produção de biocombustíveis: Etanol e biometanol.** [S.l.: S.n.].

PETROBRAS. **Petrobras testa combustível marítimo com 24% de conteúdo renovável.** Disponível em: <https://agencia.petrobras.com.br/w/sustentabilidade/petrobras-testa-combustivel-maritimo-com-24-de-conteudo-renovavel?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 19 nov. 2025.

PINHO, D. M. M. ;.; SUAREZ, P. A. Z. **Do Óleo de Amendoim ao Biodiesel-Histórico e Política Brasileira para o Uso Energético de Óleos e Gorduras From Peanut Oil to Biodiesel-History and Brazilian Policyfor the Energetic Use of Fats and Oils.** [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<http://rvq.sbq.org.br>>.

SILVA. M.C. **Política de biocombustíveis em Brasil, Índia e Estados Unidos Informações para a Aliança Global de Biocombustíveis.** [S.l.: S.n.]. Disponível em: <www.onlinedoctranslator.com>.

SANTOS, Fabio *et al.* **ISSN 0805-2010-Anuário de resumos expandidos apresentados no IX SAPCT-SENAI CIMATEC, 2024 utilização do algoritmo k-means para determinação de conteúdo de óleo vegetal hidrotratado (hvo) em diesel s10.** [S.l.: S.n.].

DNV GL. **Previsão Marítima até 2050 pela DNV.** Disponível em: <https://www.dnv.com/maritime/maritime-forecast/?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 20 nov. 2025.

SOUZA, Ozair *et al.* **Energia alternativa de biomassa: Bioetanol a partir da casca e da polpa de banana.** [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<http://www.agriambi.com.br>>.

SUBCOMITÊ DE COMBUSTÍVEIS MARÍTIMO.
relatorio_subcomite_combustiveis_maritimos. 2024.

UOL. **ANP autoriza teste de uso de biodiesel 100% em frota marítima fluvial.** Disponível em: <https://economia.uol.com.br/noticias/estadao-conteudo/2024/04/11/anp-autoriza-teste-de-uso-de-biodiesel-100-em-frota-maritima-fluvial.htm?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 20 nov. 2025.

VIBRA. **Vibra e Svitzer realizam primeiro teste com biodiesel em rebocadores portuários no Brasil.** [S.l.: S.n.]. Disponível em: <www.svitzer.com>.

WORD ECONOMIC FORUM. **O papel dos projetos de combustíveis marítimos na descarbonização do transporte marítimo** | Fórum Econômico Mundial. Disponível em: <https://www.weforum.org/stories/2024/04/why-reducing-barriers-for-maritime-fuel-projects-is-key-to-progressing-on-decarbonization/?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 20 nov. 2025.

WORLD ECONOMIC FORUM. **5 Indústria de transporte marítimo rastreador de emissão zero líquida.** [S.l.: S.n.]. Disponível em: <www.onlinedoctranslator.com>.
WU, Benteng *et al.* **Economic and environmental viability of biofuel production from organic wastes: A pathway towards competitive carbon neutrality.** Energy, v. 285, 15 dez. 2023.

X-PRESS Feeders conclui seu primeiro abastecimento de bio-metanol em Singapura | Reuters. Disponível em: <https://www.reuters.com/business/x-press-feeders-completes-its-first-bio-methanol-bunkering-singapore-2024-05-27/?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 19 nov. 2025a.