



Nota Técnica

DESCARBONIZAÇÃO DO TRANSPORTE AQUAVIÁRIO

Desafios e Trajetórias Nacionais para Combustíveis Marítimos

Agosto 2025

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
UNIÃO E RECONSTRUÇÃO

epe

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA

Coordenação Executiva

Angela Oliveira da Costa

Coordenação Técnica

Angela Oliveira da Costa

Marcelo Castello Branco Cavalcanti

Patrícia Feitosa Bonfim Stelling

Equipe Técnica

Arthur Cortez Pires de Campos

Rafael Barros de Araujo

Bruno Rodamilans Lowe Stukart

Rafael Belém Lavrador

Danielle Borher de Andrade

Rafael Moro da Mata

Marcelo Castello Branco Cavalcanti

Rachel Martins Henriques

Marina Damião Besteti Ribeiro

Vitor Manuel do Espírito Santo Silva

Patrícia Feitosa Bonfim Stelling

Supporte Administrativo

Raquel Lopes Couto

DESCARBONIZAÇÃO DO TRANSPORTE AQUAVIÁRIO

Nota Técnica NT-EPE-DPG-SDB-2025-04

Controle de revisão	Data	Descrição
r0	xx/08/2025	Publicação no site da EPE

Imagens da capa: .

1. Navio Dragão do Mar - imagem de Eudes Santana (Banco de imagens da Transpetro)
2. Demais imagens (Banco de imagens do Microsoft Windows)

Ficha técnica

(composição dos cargos em 03 de julho de 2025)



Ministro de Estado

Alexandre Silveira de Oliveira

Secretário Executivo

Arthur Cerqueira Valerio

Secretário de Energia Elétrica

Gentil Nogueira de Sá Junior

Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

Ana Paula Lima Vieira Bittencourt

Secretário de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

Pietro Adamo Sampaio Mendes

Secretário de Planejamento e Transição Energética

Gustavo Cerqueira Ataíde

www.mme.gov.br



Presidente

Thiago Guilherme Ferreira Prado

Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais

Thiago Ivanoski Teixeira

Diretor de Estudos de Energia Elétrica

Reinaldo da Cruz Garcia

Diretora de Estudos do Petróleo, Gás e Biocombustíveis

Heloisa Borges Bastos Esteves

Diretor de Gestão Corporativa

Carlos Eduardo Cabral Carvalho

www.epe.gov.br

Rio de Janeiro, 2025



Valor Público

Esta Nota Técnica aborda questões estratégicas para o desenvolvimento sustentável e eficiente do setor de transporte aquaviário, vital para a economia global, e delinea um possível plano de ação para o futuro da indústria, com o potencial de gerar impactos amplos em diversas esferas da sociedade.

O transporte marítimo mundial encontra-se em um momento desafiador devido à necessidade de descarbonização do setor. O propósito deste estudo é avaliar as principais tecnologias para os navios e apresentar propostas para combustíveis marítimos de baixa emissão (suas especificidades, vantagens/desvantagens), além de identificar as alternativas mais aderentes ao cenário brasileiro, de forma a reforçar o compromisso de redução de gases de efeito estufa (GEE), no transporte marítimo internacional.

As informações fornecidas favorecem a previsibilidade do setor, reforçam a segurança energética nacional, orientam as decisões de diferentes atores, incluindo governos, empresas e a sociedade civil, além de servirem como fundamento para a criação de políticas públicas. Em especial, este documento busca contribuir com materialidade sob alguns aspectos em suporte à Resolução CNPE nº10, de 26 de agosto de 2024.

■ Sumário

Sumário Executivo	7
Introdução	12
1. Panorama Do Transporte Aquaviário no Brasil	15
2. Combustíveis Marítimos Convencionais e Infraestrutura de Abastecimento no Brasil	18
3. Regulação da Organização Marítima (IMO) para o Transporte Marítimo Internacional.....	22
4. Sistemas de Propulsão Marítima.....	32
4.1 O Motor Diesel	33
4.2 Motor Dual Fuel (DF)	35
5. Novas Tecnologias.....	37
5.1. Células a Combustíveis.....	37
5.2 Sistemas de Propulsão Bateria-Híbrido.....	38
5.3 Sistemas de Propulsão Assistidos Pelo Vento	39
5.4 Sistemas de Lubrificação a Ar	40
5.5 Captura e Armazenamento de Carbono a Bordo	41
5.6 Propulsão Nuclear	42
6. Combustíveis Marítimos Alternativos	45
6.1. Contexto Atual	45
6.2. Gás Natural Liquefeito - GNL.....	50
6.3. Gás Liquefeito Petróleo- GLP	51
6.4. Metanol	51
6.5. Hidrogênio	52
6.6. Amônia	52
6.7. Eletrocombustíveis (em inglês, e-fuels)	53
6.8. Biocombustíveis	53
6.9. Desafios aos Combustíveis Alternativos	56

7.	Outras Iniciativas de Descarbonização do Transporte Marítimo	60
7.1.	Corredores Marítimos Verdes	60
7.2.	Frentes e Iniciativas Privadas	63
7.3.	Eficiência Operacional	64
7.4.	Atuação dos Portos na Descarbonização do Transporte Marítimo	64
8.	Trajetórias para o Transporte Aquaviário Brasileiro	68
8.1.	Metodologia.....	69
8.1.1.	Trajetória 1 - Base.....	70
8.1.2.	Trajetória 2 – Sem Combustíveis Fósseis em 2050	71
8.1.3.	Trajetória 3 – Sem Combustíveis Fósseis em 2050 – Priorizando Metanol .	72
8.1.4.	Trajetória 4 – Sem Combustíveis Fósseis em 2050 – Priorizando Biocombustíveis	73
9.	Considerações Finais.....	77
10.	Bibliografia.....	79
Apêndice A.....		90
Apêndice B		94

Lista de Figuras

Figura 1 - Comércio marítimo internacional, 2003-2024 [3]	13
Figura 2 - Emissões de GEE no transporte marítimo internacional, 2000-2023, em Mt CO ₂ [2].....	14
Figura 3 - Evolução da Frota de Apoio Marítimo no Brasil e principais marcos no setor [7].....	16
Figura 4 - Movimentação portuária de cargas no Brasil (2010 – 2023) [8]	17
Figura 5 - Principais mercadorias movimentadas nos portos brasileiros, em 2023 [9]	17
Figura 6 - Frota brasileira de navios, por tipo e quantidade (2017- 2023) [10]	18
Figura 7 - Produção de combustíveis marítimos nas refinarias brasileiras (2018-2024) [13].....	20
Figura 8 - Produção nacional de óleo combustível marítimo por refinaria e participação por UF (2024) [13]	20
Figura 9 - Produção nacional de óleo diesel marítimo por refinaria e participação por UF (2024) [13]	21
Figura 10 - Participação dos terminais aquaviários na movimentação de óleo combustível marítimo (2024) [14] [15].....	22
Figura 11 - Principais pontos da estratégia revisada da IMO 2023 [17]	23
Figura 12 - Ciclo de vida completo (well-to-wake) dos combustíveis marítimos [21]	24
Figura 13 - Limites de classificação anual do Indicador de Intensidade de Carbono (CII) [23]	27
Figura 14 - Intensidade de GEE do Combustível– Esquema simplificado do mecanismo de conformidade de dois níveis [25]	31
Figura 15 - Diagrama básico de funcionamento do motor ciclo diesel	33
Figura 16 - Sistema de hélice acionado pelo motor do navio [28]	34
Figura 17 - Motor bicomposto MAN 51/60DF (bunker, diesel, GNL e biogás) [31]	36

Figura 18 - Projeto amônia ShipFC para conversão de energia com base em amônia e célula combustível (SOFC) [37]	38
Figura 19 - Navio mineraleiro da Vale, equipado com um sistema de velas rotativas [38]	40
Figura 20 - Esquema ilustrativo do sistema de lubrificação a ar instalado no casco do navio [39].....	41
Figura 21 - Cadeia de valor do uso da tecnologia CCS [40]	42
Figura 22 - Ilustração de um projeto de construção e instalação de SMR a bordo de navio [43].....	45
Figura 23 - Consumo de combustível alternativo na frota mundial de navios, em número de navios , em junho 2024 [17].....	46
Figura 24 - Consumo de combustível alternativo, na frota mundial de navios, segundo arqueação bruta (AB), em junho 2024 [17]	47
Figura 25 - Encomendas de novos navios a combustível alternativo, em junho 2024) [17]	48
Figura 26 - Aspectos relevantes para viabilização dos combustíveis alternativos no transporte marítimo	49
Figura 27 - Influência da densidade energética e poder calorífico sobre os combustíveis [44]	50
Figura 28 - Densidade energética, vantagens e desvantagens entre os principais combustíveis convencionais e os biocombustíveis para uso no transporte marítimo [49] e [56]	57
Figura 29 - Anúncios de uso de biocombustíveis em misturas com bunker por parte de algumas empresas de comércio de combustível marítimo.	58
Figura 30 - Anúncios de abastecimento de navios com mistura bunker + B24 [58] [61]	59
Figura 31 - Principais fases para a implementação de corredores marítimos verdes [62].....	61
Figura 32 - Iniciativas anunciadas de corredores marítimos verdes, em 2023 [62]	62
Figura 33 - Portos participantes do regime de incentivo ESI para navios [74] 66	

Figura 34 - Metodologia aplicada às trajetórias de atendimento da demanda energética por combustíveis alternativos.....	69
Figura 35 - Trajetórias de atendimento da demanda por combustíveis marítimos de baixa emissão (combustíveis alternativos).....	70
Figura 36. Evolução do consumo energético e das emissões do transporte aquaviário na trajetória 1 – com combustíveis fósseis em 2050	71
Figura 37 - Evolução do consumo energético e das emissões do transporte aquaviário na trajetória 2 - Sem combustíveis fósseis em 2050	72
Figura 38 - Evolução do consumo energético e das emissões do transporte aquaviário na trajetória 3 - Sem combustíveis fósseis em 2050, priorizando metanol e amônia	73
Figura 39 - Evolução do consumo energético e das emissões do transporte aquaviário na trajetória 4 - Sem combustíveis fósseis em 2050, priorizando biocombustíveis	74
Figura 40 - Evolução do consumo energético e das emissões do transporte aquaviário na trajetória 4a - Sem combustíveis fósseis em 2050, priorizando biocombustíveis + melhores práticas de agricultura combinadas com BECCS75	
Figura 41 - Anúncios de encomendas de novos navios a combustível alternativo, por grandes empresas do transporte marítimo.....	95

Lista de Quadro

Quadro 1 - Cronograma das principais ações da IMO [21].....	27
Quadro 2 - Outros resultados obtidos da MEPC 83 [24]	32
Quadro 3 - Iniciativas privadas para descarbonização do transporte marítimo [68]; [69]; [70]; [71].....	63
Quadro 4 - Consolidação das trajetórias projetadas	76

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Redução anual média da intensidade carbônica comparativamente à média de 2020 (91,16 gCO _{2e} /MJ) [17] [82].	90
---	----

Sumário Executivo

Com o objetivo de analisar as alternativas e soluções viáveis para a transição para combustíveis de baixa emissão (combustíveis alternativos) para uso transporte aquaviário, o documento apresenta um panorama do transporte aquaviário, examina as alternativas energéticas disponíveis, as perspectivas da adoção de combustíveis de baixo carbono, as medidas e tecnologias para incrementar a eficiência energética das embarcações, as estratégias e implicações regulatórias, o papel dos portos e os corredores verdes, o potencial dos biocombustíveis na descarbonização, suas vantagens, barreiras e desafios para implementação. Ademais, são apresentadas trajetórias nacionais para a inserção dos combustíveis marítimos alternativos em atendimento à demanda energética e os impactos na redução dos gases de efeito estufa no horizonte de longo prazo.

Os principais pontos abordados nesta Nota Técnica são:

- O Transporte aquaviário tem um papel crucial na economia, sendo responsável por aproximadamente 90% do comércio mundial e 3% das emissões de GEE.
- No Brasil, o transporte aquaviário é de vital importância para a infraestrutura logística, dado que o País possui uma extensa costa com grande potencial para a movimentação de cargas, notadamente pela sua posição geográfica e seu papel como um grande exportador de commodities.
- As modalidades do transporte aquaviário brasileiro são: a navegação de longo curso, cabotagem, navegação interior, transporte de passageiros, navegação de apoio marítimo e navegação de apoio portuário.
- Para garantir o abastecimento das embarcações, o Brasil conta com uma ampla rede de infraestrutura, que envolve produtores, distribuidores e comercializadores de combustíveis marítimos, portos e terminais aquaviários.
- Os regulamentos mundiais para a descarbonização do transporte marítimo apontam para ações que incluem: eficiência energética, implantação de novas tecnologias e o uso de combustíveis de baixa emissão para uso nos navios.
- No âmbito dos regulamentos da IMO, dentre as ações previstas, destaca-se que até 2030, as emissões totais de GEE da indústria marítima devem ser reduzidas em pelo menos 20% (visando 30%), em comparação com os níveis de 2008,

garantindo que a indústria continue a sua progressão em direção aos objetivos de 2040 e 2050. Ademais, a adoção de tecnologias, combustíveis e/ou fontes de energia com emissões nulas ou quase nulas de GEE deverão representar pelo menos 5% (visando atingir 10%), da energia utilizada pelo transporte marítimo, em 2030.

- As emissões de GEE serão calculadas na perspectiva *well-to-wake* (do poço à esteira), ou seja, incluem as emissões relacionadas à extração, produção, armazenamento, transporte e abastecimento do combustível, além das emissões provenientes da energia utilizada a bordo do navio.
- Medidas de eficiência técnica e operacional poderiam ser suficientes para alcançar, a curto prazo, a conformidade dos regulamentos de GEE e assim reduzir a necessidade de consumo de combustíveis mais dispendiosos. Medidas de eficiência operacional estão relacionadas com a forma como a embarcação é mantida e operada, em geral com baixos custos de investimento e moderados custos operacionais.
- As medidas de eficiência técnica geralmente, visam reduzir a propulsão e demanda de energia do motor auxiliar. Entretanto, muitas medidas técnicas são limitadas à aplicação em novas embarcações, devido às dificuldades ou aos elevados custos de modernização de navios existentes.
- O aumento do custo de operar com combustíveis neutros em carbono ajudará a impulsionar a operação mais eficiente da frota de navios e simultaneamente melhorar medidas de eficiência energética.
- Dentre as tecnologias que vêm sendo instaladas nos navios, destacam-se: os sistemas de propulsão assistidos pelo vento, sistema de lubrificação a ar, sistemas de propulsão bateria-híbrido e os motores *dual fuel* (bicombustível). Além dessas, estão sendo desenvolvidas as tecnologias de captura e armazenamento de carbono a bordo (CCS), células a combustível e a propulsão nuclear.
- Atualmente, 98% da frota de mundial de navios utiliza combustíveis convencionais (em números de navios). Apenas 2% utilizam combustíveis alternativos (2357 navios), com destaque para o GNL, Bateria/Híbrido, GLP, Metanol, Amônia e Hidrogênio;
- Até junho de 2024, foram encomendados 1.630 novos navios movidos a combustíveis alternativos, o que representa 27,1% do total das encomendas. O GNL ainda é a escolha principal (832 navios), sendo também possível utilizá-lo, na modalidade *dual-fuel*, junto com o *bunker*. Segue-se Bateria-híbrido (433), metanol (233), GLP (96), Amônia (25) e Hidrogênio (10) como opções de energia alternativa;
- Devido às incertezas em torno da disponibilidade de combustíveis de baixas emissões, muitos armadores começaram a construir ou modernizar as suas frotas e incluir navios bicombustíveis (*dual fuel*).

- Uma série de inovações já estão sendo aplicadas aos novos navios de dois tempos e de quatro tempos. No entanto, o maior desafio para reduzir as emissões de GEE no setor marítimo, diz respeito a frota mercante existente;
- Os biocombustíveis apresentam-se como uma solução de descarbonização extremamente atrativa para os armadores, uma vez que elimina a necessidade de investimentos de capital em grande escala, que são necessários para outras opções de descarbonização e, por serem considerados do tipo *drop in*, ou seja, podem ser utilizados sem necessidade de alterações na infraestrutura existente;
- A Organização Internacional de Normalização (ISO) apresentou no primeiro semestre de 2024 a Norma revisada ISO 8217/24, que define as classificações e os tipos de combustíveis marítimos, bem como os requisitos de qualidade e especificações. A revisão incorporou mudanças importantes, com destaque à crescente utilização de misturas de biocombustíveis ao combustível marítimo convencional, em resposta à descarbonização do transporte marítimo (autorizando a utilização de até 100% de biodiesel para navegação, com uso condicionado a avaliações da MARPOL/IMO);
- Diversos fornecedores mundiais de *bunker* estão disponibilizando nos principais portos (Singapura e Roterdan), misturas B24 e B30, proveniente de matéria-prima residual (FAME);
- No Brasil, a Petrobras foi autorizada pela ANP e já comercializa *bunker* com misturas B24 em navios da Transpetro; a Vale também efetuou o primeiro abastecimento (2023) de um navio minereiro, com mistura B24, de biodiesel oriundo óleo de cozinha residual.
- Os corredores verdes são reconhecidos como um mecanismo fundamental para que a descarbonização do transporte marítimo avance e consiga atingir as metas da IMO, em 2030. São definidos como rotas marítimas específicas (entre dois ou mais portos), onde a viabilidade tecnológica, econômica e regulamentar do transporte marítimo com emissões zero é catalisada por uma combinação de ações públicas e privadas.
- Os portos podem facilitar a descarbonização do transporte marítimo através da adoção de medidas técnicas e operacionais na interface navio-porto, dentre as quais: fornecimento de energia em terra, fornecimento de combustíveis alternativos, uso de tecnologias digitais para facilitar a chegada de navios nos portos com vistas a atracação e uso de berços, sistema de automação de operação de terminais de containers e prestação de serviços diversos, como limpeza de hélice e casco, entre outros;
- A implementação de políticas, como incentivos, é um passo vital para a descarbonização do transporte marítimo. Os regimes de incentivos (taxas portuárias ambientalmente diferenciadas) e subvenções são estabelecidos para acelerar a aceitação e apoiar investimentos na adoção de tecnologias em portos, transportes terrestres e navios;
- O exercício de trajetórias para atendimento da demanda por combustíveis marítimos de baixa emissão, em um cenário de longo prazo (2024-2050), aponta

os seguintes resultados: Trajetória Base – com redução de emissões 61%; Trajetória 2 – com redução de emissões de 91%; Trajetória 3 – com redução de emissões de 90%; Trajetória 4 – com redução de emissões 80%; Trajetória (acessória) 4a – com redução de emissões de 102%.

- Com exceção da trajetória base, todas as demais não utilizam combustíveis fósseis em 2050. Em todos as trajetórias foi considerada uma participação de hibridização e eletrificação, em embarcações de transporte de passageiros.
- A navegação interior é suprida por biocombustíveis, em todos as trajetórias (a partir de 2026) em substituição ao óleo diesel marítimo, chegando a 100% em 2050, com percentuais distintos de biodiesel e etanol.
- Na navegação por cabotagem, para as trajetórias base, 1 e 2, a participação do biodiesel alcança 30% (2038). A penetração de combustíveis alternativos inicia-se em 2034, com percentuais variados (etanol, metanol, amônia e hidrogênio). Os cenários 4 e 4a priorizam a participação de biodiesel e etanol, associada com práticas sustentáveis na agricultura e tecnologias agrícolas sustentáveis, com alto potencial de mitigação das emissões de GEEs, em combinação com captura e armazenamento geológico de dióxido de carbono proveniente da biomassa (BioEnergy with Carbon Capture and Storage –BECCS), a partir de 2034, o que faz com que se atinja emissões negativas em 2050.
- A navegação de longo curso, nas trajetórias base, 2 e 3, caracteriza-se por utilizar biodiesel no curto prazo e GNL no médio prazo. Os combustíveis alternativos entram na matriz, a partir de 2034. As trajetórias 4 e 4a, priorizam a participação de biodiesel e etanol, associado com práticas sustentáveis na agricultura e utilização de BECCS (a partir de 2034), o que faz com que se atinja emissões negativas em 2050.
- Na trajetória 3, a utilização de metanol e amônia são priorizados (principalmente a partir de 2040), nas navegações de cabotagem e longo curso. Neste caso, o hidrogênio assume o papel de insumo para a produção destes combustíveis, não sendo inserido diretamente como combustível, para propulsão das embarcações.
- Foram considerados ganhos de eficiência de 30% em todas as trajetórias. Esses ganhos levam em conta a aplicação gradual das medidas de eficiência energética discutidas ao longo da publicação. Mas também levam em conta ganhos de eficiência tecnológica das novas motorizações. Além de melhorias portuárias, que permitem reduzir o tempo que as embarcações precisam esperar para aportar (tempo de atracamento), diminuindo o consumo energético para execução desta atividade pelas embarcações.
- Para a descarbonização do setor marítimo, a penetração de combustíveis alternativos, incluindo biocombustíveis, hidrogênio, amônia e eletricidade, precisará evoluir, apesar das várias incertezas.
- A neutralidade tecnológica e a diversidade de opções devem ser princípios a serem seguidos.

- Vale citar que o Brasil está em posição de destaque em termos de biotecnologia e bioenergia, com uma indústria de biocombustíveis competitiva que pode contribuir para a descarbonização do setor marítimo.
- O potencial de uso de biocombustíveis tradicionais e avançados para descarbonizar o setor marítimo deve ser o foco das discussões no Brasil em fóruns internacionais.
- Práticas avançadas na cadeia de produção de biocombustíveis permitem que o Brasil alcance emissões negativas de GEE.
- A Comissão Coordenadora de Assuntos da IMO (CCA-IMO), coordenada pela Marinha do Brasil e composta por 13 Ministérios e uma Agência Reguladora convidada, é responsável por elaborar as posições defendidas pela delegação brasileira, cujo principal desafio tem sido promover o uso sustentável dos biocombustíveis como parte de uma transição energética mais ampla, justa e inclusiva. Além disso, o Brasil defende um sistema global de especificação das emissões de CO₂ que, ao incluir os biocombustíveis de forma favorável, incentive seu uso no transporte marítimo e, ao mesmo tempo, não penalize desproporcionalmente os países em desenvolvimento.

O transporte aquaviário mundial atravessa um momento delicado, com a transição energética tendo que enfrentar desafios e barreiras para alcançar a descarbonização e redução dos GEE, concomitante com conflitos geopolíticos e a intensificação das alterações climáticas.

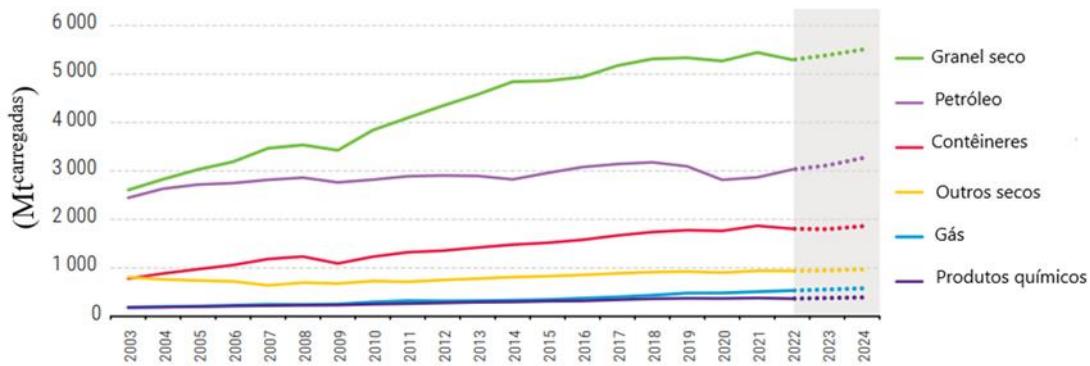
Introdução

O Transporte marítimo tem um papel crucial na economia, sendo responsável por aproximadamente 90% do comércio mundial [1], portanto, seu equilíbrio reflete diretamente na oferta e na demanda dos produtos. De acordo com a UNCTAD¹, em 2023, o comércio marítimo mundial recuperou-se modestamente da contração observada em 2022, crescendo 2,4% (12,3 bilhões de toneladas), com projeção de crescer 2% em 2024 e uma média de 2,4% anualmente até 2029. A demanda por minério de ferro, carvão e grãos continua forte, enquanto o comércio de contêineres – com alta de apenas 0,3% em 2023 – deve se recuperar em 3,5% em 2024, dependendo da estabilização da cadeia de suprimentos. Tensões geopolíticas, conflitos e eventos climáticos tem causado estrangulamento em algumas das principais rotas comerciais (como os canais de Suez e Panamá)², forçando a alteração de rotas, sobrecarregando as cadeias de suprimento, aumentando o consumo de combustíveis marítimos (e suas emissões) e o custo do frete, com impacto profundo na segurança alimentar, no fornecimento de energia e na economia global. Em contraste, a necessidade por cadeias de suprimentos mais ecológicas e resilientes está incentivando um comércio mais curto e com foco regional, potencialmente impulsionando as conexões marítimas intrarregionais. Além disso, o setor marítimo enfrenta um aumento de registros fraudulentos de navios (o que serve de alerta para IMO) prejudicando a segurança, a proteção, o controle da poluição e o bem-estar dos marítimos [2].

¹ A UNCTAD (sigla em inglês), Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento é um órgão intergovernamental permanente estabelecido pela Assembleia Geral das Nações Unidas em 1964, cuja sede está localizada em Genebra, na Suíça, para o tratamento integrado entre comércio e desenvolvimento, assim como de assuntos correlacionados às áreas de finanças, tecnologia, investimento e desenvolvimento sustentável [3].

² Nos primeiros dois meses de 2024, o comércio pelo Canal de Suez reduziu 50% em relação a 2023, e o do Canal do Panamá caiu 32%, interrompendo as cadeias de suprimentos e distorcendo os principais indicadores macroeconômicos. Desde dezembro de 2023, a milícia houthi, sediada no Iêmen, intensificou os ataques a cargueiros no Mar Vermelho em apoio ao grupo fundamentalista islâmico Hamas no atual conflito contra Israel. A redução do tráfego no Canal de Suez, tem forçado as embarcações a desviarem suas rotas pelo Cabo da Boa Esperança (África), com aumento do tempo de viagem. Esse aumento do tempo de viagem também foi observado no Canal do Panamá. No segundo semestre de 2023, este canal reduziu o tráfego de embarcações, devido a uma seca histórica no Lago Gatún, que fornece a água para operar suas eclusas, limitando o número de passagens de embarcações por dia, o que forçou a desvio de rotas. Atrasos no canal do Panamá, juntamente com interrupções nas rotas de transporte do Mar Vermelho, levaram a maiores taxas de transporte global, pois menos embarcações estavam disponíveis para transportar produtos [95] [96]. As alterações climáticas também têm impactado grandemente o transporte aquaviário no Brasil. No final de 2023 e 2024, uma seca extrema provocou a baixa acentuada dos níveis dos rios da Região Amazônica, impedindo a navegação e, consequentemente, a movimentação de pessoas e mercadorias. Em abril de 2024, a cidade de Porto Alegre (RS) foi atingida por fortes chuvas, que elevaram o nível dos rios e assolaram a população com enchentes, provocando perdas materiais, vítimas mortais e enormes prejuízos econômicos, inclusive afetando fortemente a movimentação portuária do Estado [8].

A Figura 1 apresenta a movimentação do comércio marítimo internacional, com destaque para os navios que operam com cargas de granel seco, petróleo e contêineres.



Nota: Os anos 2023/2024 referem-se a previsão. “Granel seco” inclui granéis principais (minério de ferro, carvão e grãos) e granéis menores (metais, minerais, granéis agrícolas e produtos leves); “Petróleo” abrange petróleo bruto e seus derivados; “Outros produtos secos” é uma estimativa de produtos secos que não estão incluídos em granéis principais/menores, por exemplo, carros e outros veículos, cargas Ro-Ro e de projeto, bem como aquelas refrigeradas que não vão em contêineres e cargas fracionadas; “Gás” inclui GLP, GNL e amônia. [3]

Figura 1 - Comércio marítimo internacional, 2003-2024 [3]

Ademais, o comércio marítimo internacional foi bastante afetado pelo conflito Ucrânia-Rússia (iniciado em fevereiro 2022), ocasionando mudanças nos padrões do transporte marítimo e aumentando as distâncias percorridas para mercadorias como grãos³ e petróleo⁴. Observou-se um crescimento do comércio de petróleo e gás natural (respectivamente 6 % e 4,6%), atribuído a volta à normalidade pós-pandemia. Por outro lado, houve uma diminuição no transporte de contêineres e granéis secos, impactado principalmente pela inflação elevada, pelo arrefecimento da economia global e a normalização da procura, após aumento incomum no decorrer da pandemia Covid-19 [3].

Embora seja essencial para o comércio mundial, o transporte marítimo internacional também contribui significativamente com emissões de gases de efeito estufa (3%) e,

³ Os embarques de grãos percorreram distâncias mais longas em 2023, do que em qualquer outro ano já registrado. Apesar do retorno do embarque de cereais, por parte da Ucrânia, em 2022 (Iniciativa do Mar Negro), diversos países importadores recorreram a exportadores alternativos, como por exemplo, com compra de cereais dos Estados Unidos ou do Brasil, o que exigiu viagens mais longas [3].

⁴ O petróleo bruto e os produtos refinados percorreram distâncias maiores, a medida em que a Federação Russa procurava novos mercados de exportação para a sua carga e a Europa buscava fornecedores alternativos de energia [3]. Neste contexto, Brasil, Índia, Emirados Árabes Unidos, China, Grécia, Singapura, Malásia e Arábia Saudita, por sua vez, se alternam entre os cinco principais mercados da Rússia, ao longo de 2023. Com o desconto oferecido pela Rússia, os produtos acabam migrando para países onde as sanções são menos relevantes [108].

assim, como as demais atividades econômicas, necessita reduzir sua pegada de carbono [1].

Segundo a UNCTAD, as emissões de GEE do transporte marítimo tornaram a crescer após a pandemia Covid-19 (2020). O ano de 2023 deve marcar o pico de emissões, dado que até março, já tinham sido emitidos 848Mt de dióxido de carbono, conforme. Figura 2 [2].



Figura 2 - Emissões de GEE no transporte marítimo internacional, 2000-2023, em Mt CO₂ [2].

O agravamento dos desafios ambientais, com o incremento das emissões, é atribuído à complexidade que o transporte marítimo tem enfrentado nos últimos anos, devido aos conflitos geopolíticos, que impuseram o redirecionamento das rotas marítimas (mais longas), elevando o consumo de combustível, os custos operacionais, o trânsito nos portos, para além de incrementar a velocidade das embarcações, para atendimento dos contratos. Adiciona-se a isto, a existência de uma frota mundial de embarcações envelhecida, cuja idade média é de 22,2 anos (2023), ou seja, com idade avançada, que inviabiliza a possibilidade de conversão (retrofit) [2].

1. Panorama Do Transporte Aquaviário no Brasil

O transporte aquaviário é de vital importância para a infraestrutura logística do Brasil, dado que possui uma extensa costa com grande potencial para a movimentação de cargas, notadamente pela sua posição geográfica e seu papel como um grande exportador de commodities. Isto possibilita que o transporte marítimo de longo curso, a partir dos diversos portos espalhados ao longo do País, acesse as principais rotas do comércio mundial, na Ásia, Europa e América do Norte.

Ressalta-se também, o transporte aquaviário por cabotagem, uma modalidade fundamental para a infraestrutura de abastecimento, que consiste no transporte de mercadorias entre portos nacionais, com alta capacidade de movimentar cargas de grande volume, tanto de commodities como de produtos industrializados, conectando diferentes regiões do País.

Outrossim, a navegação interior, também conhecida como navegação fluvial ou transporte hidroviário, é uma modalidade de transporte que utiliza hidrovias, para movimentar cargas e pessoas, extremamente crucial em regiões onde a infraestrutura terrestre é limitada (ou impossível) ou onde a logística por outras modalidades seria mais cara ou ineficiente.

Há de se destacar as navegações de apoio marítimo e portuário, essenciais para viabilizar operações logísticas de apoio ao transporte aquaviário e propiciar segurança e eficiência nas operações portuárias, entre outras atividades. Ambas as navegações são realizadas por diversos tipos de embarcações, entre as quais: rebocadores, supridores e embarcações de dragagem. A navegação de apoio portuário é realizada exclusivamente nos portos e terminais aquaviários, para atendimento a embarcações e instalações portuárias [4].

O mercado de embarcações de apoio marítimo é bastante promissor, dado a vocação do País na exploração e produção de petróleo e gás no mar (offshore) [5]. De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2034 [6], o Brasil atingirá o pico de produção de petróleo em 2029 (5,2 Mb/d), tornando-se o 5º maior produtor do mundo com impactos na economia nacional e reflexos para o setor de apoio marítimo, contribuindo para a geração de empregos diretos e indiretos, grande parte deles de alta qualificação [5]. O dinamismo do setor de embarcações de apoio marítimo depende de pelo menos três fatores principais: (i) nível de preços de petróleo; (ii) ritmo de rodadas de licitação da ANP; (iii) interesse dos investidores em arrematar blocos exploratórios no mar no Brasil. Nos anos recentes, a frota de embarcações de apoio a plataformas de bandeira nacional tem apresentado crescimento conforme pode ser visualizado na

Figura 3. Essa evolução foi possível graças ao arcabouço legal⁵ e iniciativas presentes no Brasil que buscam favorecer a construção de embarcações de bandeira nacional [5].

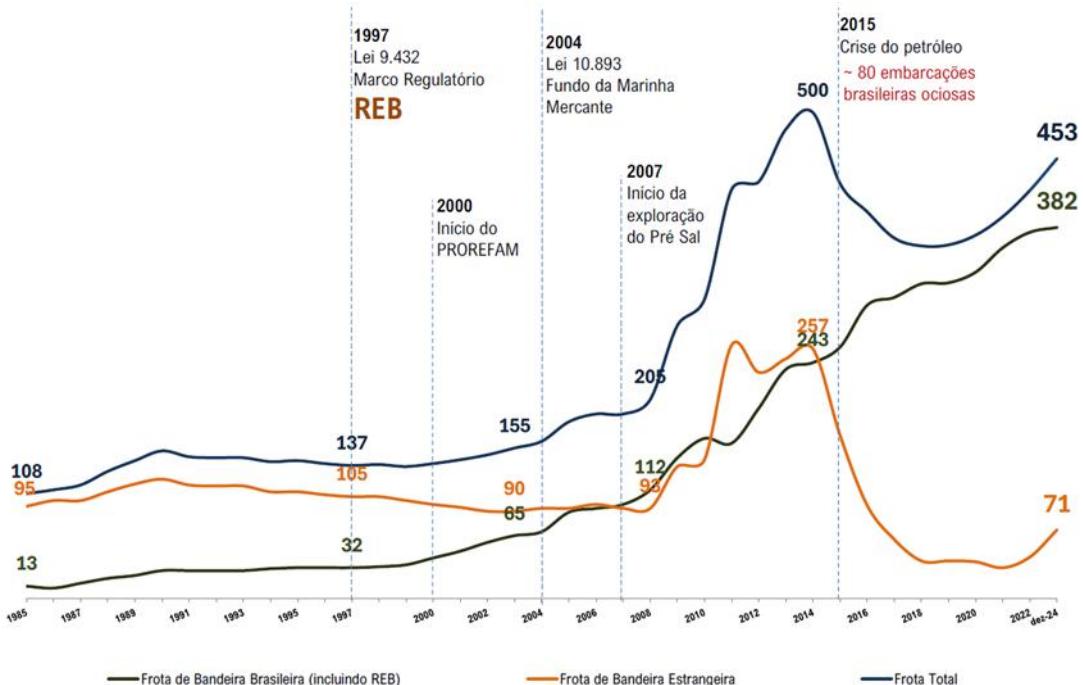


Figura 3 - Evolução da Frota de Apoio Marítimo no Brasil e principais marcos no setor [7]

Por sua vez, os portos apresentam importância singular, sendo classificados como portos organizados (públicos) ou terminais autorizados (TUP – Terminal de Uso Privado), responsáveis por grande parte das importações e exportações do País.

Em 2023, 1,3 bilhão de toneladas de carga foram movimentados nos portos brasileiros, um aumento de 6,9% em relação ao registrado em 2022, com participação do transporte de longo curso (71%), cabotagem (22%), navegação interior (6,4%), apoio portuário (0,2%) e apoio marítimo 0,1% [8]. Os terminais autorizados (TUPs) foram responsáveis por 65,4% da movimentação portuária contra 34,6% dos portos organizados. O perfil da carga mostra a elevada participação de granéis sólidos (61%), granéis líquidos (25%), contêineres (9,8%) e carga geral (4,6%). A Figura 4 apresenta a movimentação de cargas no Brasil, no período 2010-2023.

⁵ A partir do marco regulatório Lei 9.432/1997, observa-se um processo de revigoramento da indústria naval brasileira, que instituiu o REB (Registro Especial Brasileiro) para estimular o desenvolvimento de empresas brasileiras de navegação. Em 2000, foi lançado pela Petrobras, o Programa de Renovação da Frota de Embarcações de Apoio Marítimo (Prorefam), que garantia contratos de oito anos de prestação de serviços. A partir da Lei 10.893/2004, recursos do Fundo da Marinha Mercante (FMM) podem ser destinados para a construção de embarcações em estaleiros brasileiros [7].

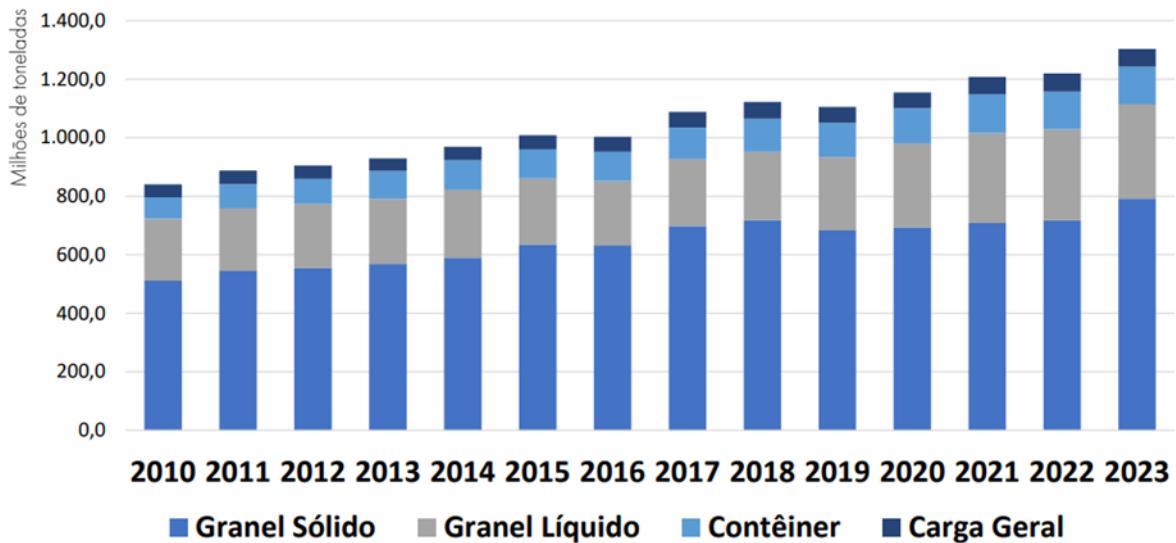


Figura 4 - Movimentação portuária de cargas no Brasil (2010 – 2023) [8]

Os 5 maiores portos em movimentação de carga foram: (i) o terminal marítimo de Ponta da Madeira (166,3Mt), em Itaqui, no Maranhão (ii) o porto de Santos (135,9Mt), em Santos, São Paulo; (iii) o terminal de Tubarão, em Vitória (76,0Mt), Espírito Santo; (iv) o terminal aquaviário de Angra dos Reis, no Rio de Janeiro (63,7Mt); (v) o porto de Paranaguá (58,3 Mt), no Paraná [9]. A Figura 5 aponta o perfil das principais mercadorias movimentadas no sistema portuário do País, em 2023.

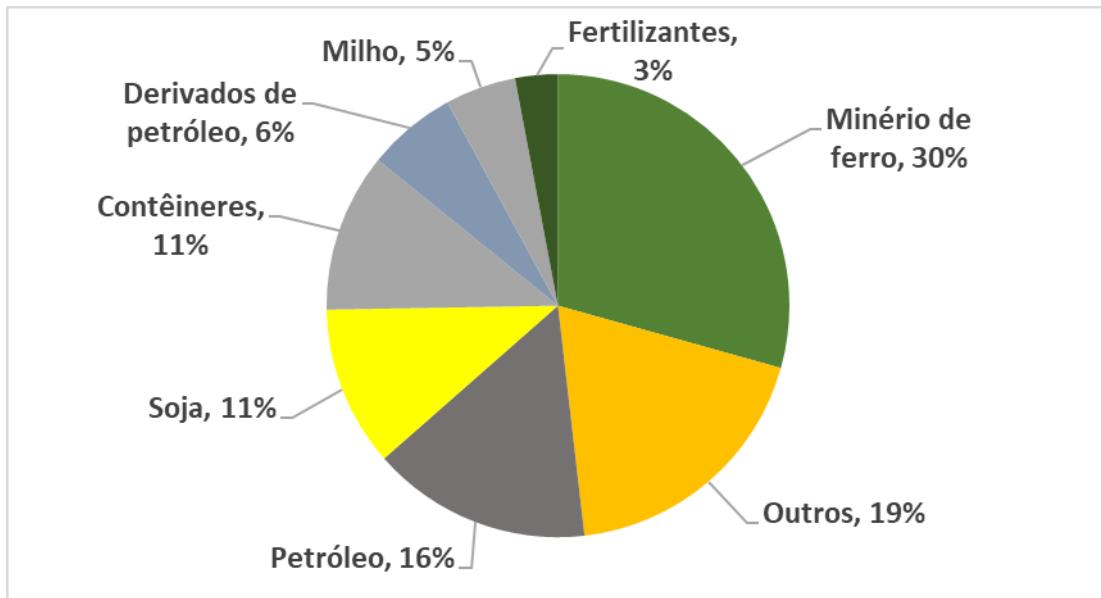


Figura 5 - Principais mercadorias movimentadas nos portos brasileiros, em 2023 [9]

De acordo com a ANTAQ [8], o minério de ferro é escoado principalmente pelos portos do Nordeste e Sudeste; para o petróleo bruto, 50% da movimentação é realizada por terminais do Rio de Janeiro; os maiores movimentadores de soja são os portos de Santos, Paranaguá e Itaqui. Já os portos organizados são as principais vias de entrada de fertilizantes, representando 83% do total; 28% da movimentação de contêineres do país, sendo realizado pelo porto de Santos.

A balança comercial brasileira, apresentou superávit de U\$ 87 bilhões (2023), com as exportações alcançando o valor de aproximadamente U\$ 340 bilhões contra importações de U\$ 253 bilhões. Esse superávit foi impulsionado pela demanda crescente de commodities (principalmente minério de ferro, soja e petróleo), com a China respondendo por 53% das exportações brasileiras. No caso das importações, as principais mercadorias internalizadas foram: fertilizantes, derivados de petróleo, mercadorias em contêineres, carvão mineral, petróleo, outros [8]. Nesse contexto, a atividade do transporte aquaviário de cargas é imensamente impactada, devido a movimentação crescente de cargas, não só na navegação de longo curso, mas também na cabotagem e navegação interior. A Figura 6 apresenta a frota nacional, por tipo de navio e quantidade.

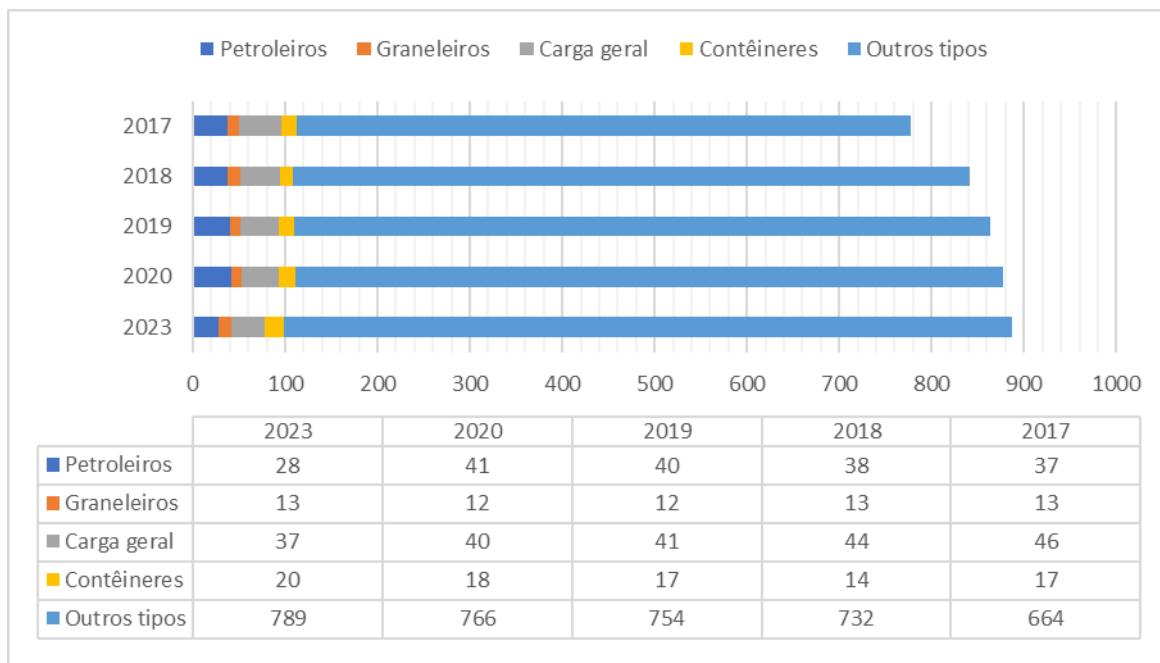


Figura 6 - Frota brasileira de navios, por tipo e quantidade (2017- 2023) [10]

2. Combustíveis Marítimos Convencionais e Infraestrutura de Abastecimento no Brasil

A cadeia de abastecimento de bunkers é altamente complexa, com muitos tipos diferentes de empresas envolvidas no ecossistema de bunkers. Estes incluem empresas controladas pelo Estado, grandes empresas petrolíferas, empresas independentes do

petróleo, casas de comércio de matérias-primas, comerciantes de petróleo, terminais de armazenamento, comerciantes internacionais de bunker, plataformas de aquisição on-line, corretores, pequenos comerciantes regionais de bunker, pools de abastecimento que servem frotas marítimas e alianças de compra de bunker. Todos estão envolvidos em diferentes estágios - desde a produção, transporte e armazenamento até a aquisição, vendas e entrega a diversos usuários finais.

Para garantir o abastecimento das embarcações, o Brasil conta com uma ampla rede de infraestrutura, que envolve produtores, distribuidores e comercializadores de combustíveis marítimos.

Os combustíveis utilizados nas embarcações podem ser classificados em duas categorias:

- a) Residuais – são produzidos a partir de frações residuais do refino recebendo a denominação de: OCM (Óleo Combustível Marítimo), MF (Marine Fuel), VLSFO (Very Low Sulfur Fuel Oil), ULSFO (Ultra Low Sulfur Fuel Oil) ou bunker;
- b) Destilados – são produzidos a partir das frações mais leves do processo de refino (gasóleos atmosféricos, majoritariamente) sendo chamados de Diesel Marítimo (DMA e DMB) ou MGO (Marine Gasoil).

Os OCM e o MGO são utilizados em motores principais, de grandes dimensões, nos sistemas de propulsão de navios de grande porte. São motores de combustão interna que operam segundo o ciclo Diesel e, por isso, apresentam requisitos de qualidade diversos daqueles necessários aos óleos combustíveis industriais. O MGO é utilizado principalmente nos sistemas auxiliares de geração de energia ou de emergência dessas embarcações. Entretanto, pode ser utilizado em motores principais, de propulsão, em embarcações de médio e pequeno porte [11]. A ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) define as especificações dos combustíveis aquaviários e suas regras de comercialização em todo o território nacional (Resolução nº 903, de 18 de novembro de 2022). A Resolução descreve duas categorias para diesel marítimo (DMA e DMB) e três categorias para o óleo combustível marítimo (OCM120, OCM180 e OCM380), cujos números referem-se ao limite máximo de viscosidade à 50°C [12].

A produção dos combustíveis marítimos é realizada pelas refinarias brasileiras. Em 2024, as refinarias produziram 6,7 Mm³ de óleo combustível marítimo e 3,7 Mm³ de óleo diesel marítimo. A Figura 7 apresenta a produção destes combustíveis no período 2018-2024 [13].

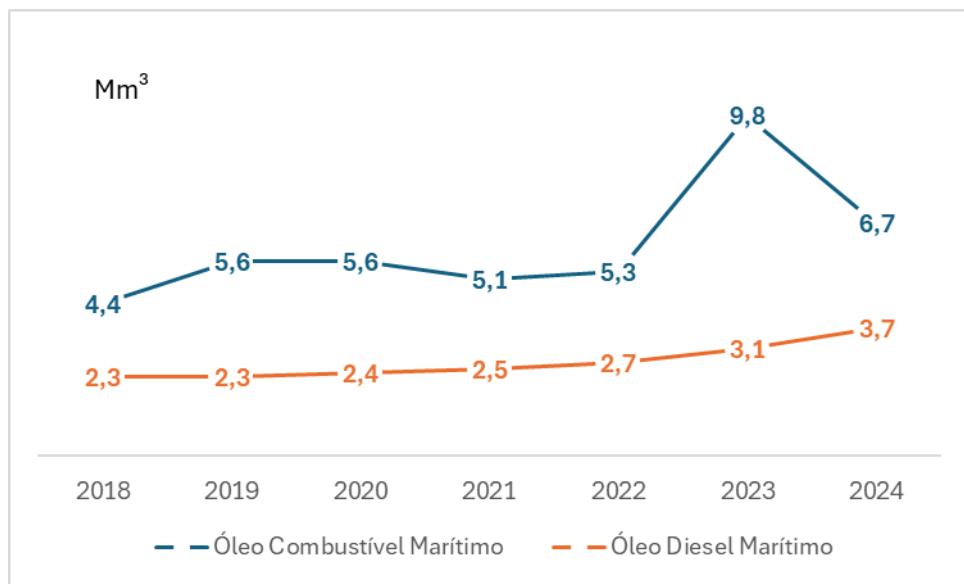


Figura 7 - Produção de combustíveis marítimos nas refinarias brasileiras (2018-2024) [13]

Observa-se que em 2023, a produção de bunker aumentou cerca de 85% em relação a 2022. Da mesma forma, desde 2019, nota-se um crescimento na produção de diesel marítimo (de 19% em 2024, quando comparado a 2023).

A Figura 8 mostra a produção nacional de óleo combustível marítimo por 12 refinarias e participação por unidade federativa (UF), em 2024. As refinarias de São Paulo (Replan, Rpbc, Revap e Recap) foram responsáveis por 44% da produção [13].

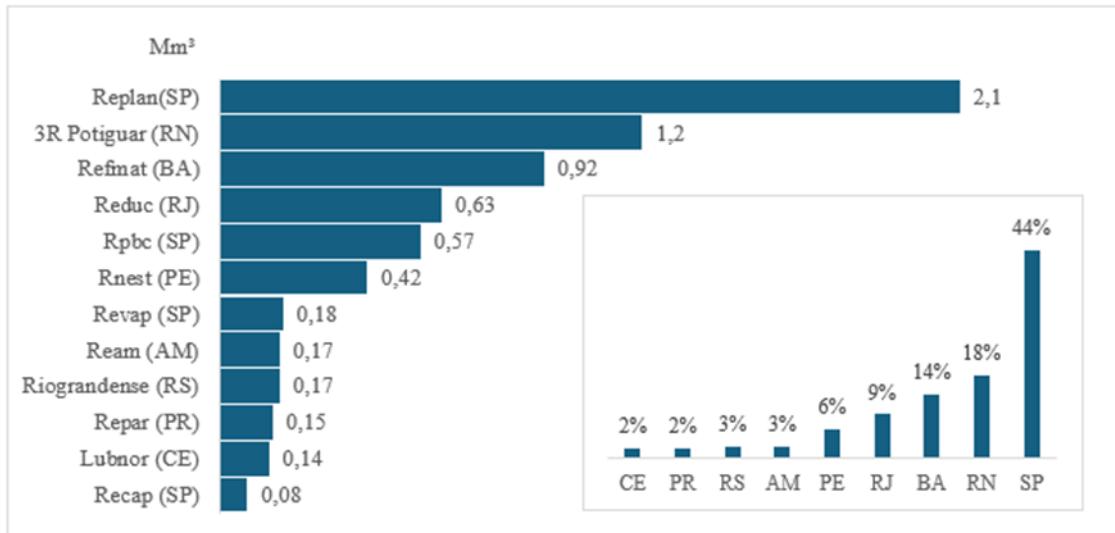


Figura 8 - Produção nacional de óleo combustível marítimo por refinaria e participação por UF (2024) [13]

No caso do óleo diesel marítimo, 11 refinarias responderam pela produção no País em 2024, com destaque para as refinarias do Rio de Janeiro (Reduc e Refit) responsáveis por 40%, seguido pelas refinarias de São Paulo (RPBC, Revap e Replan) com 27% e a Refmat (BA) com 8%, de acordo com Figura 9.

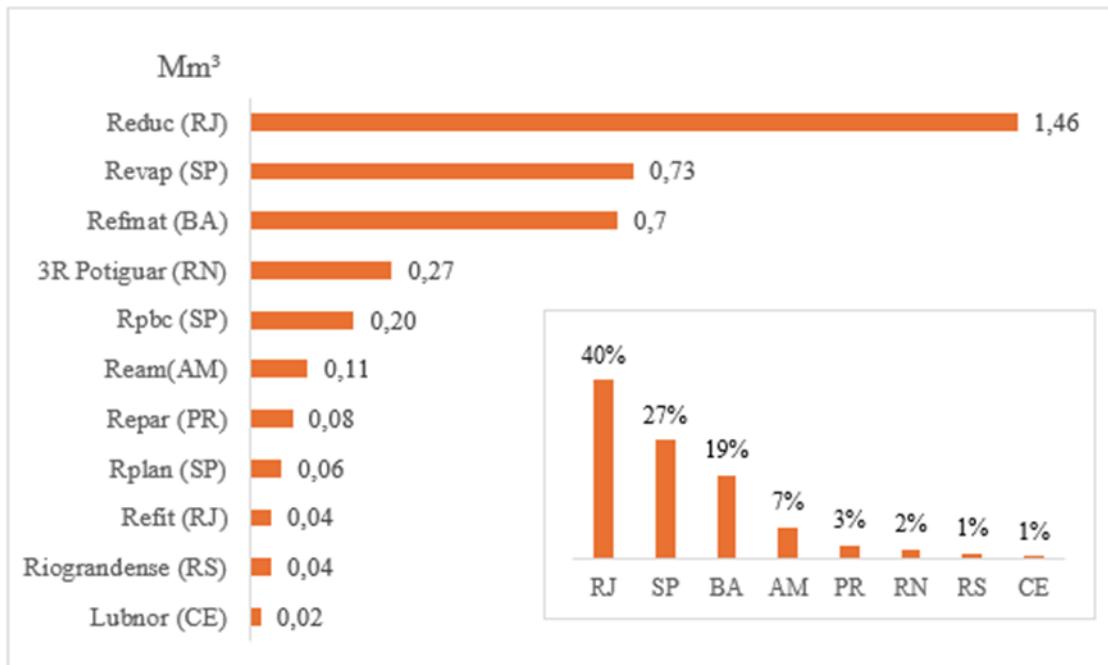


Figura 9 - Produção nacional de óleo diesel marítimo por refinaria e participação por UF (2024) [13]

O abastecimento das embarcações por combustíveis marítimos ocorre principalmente por meio de terminais aquaviários (TA) localizados ao longo da costa brasileira. A Figura 10 aponta a participação dos terminais na movimentação⁶ de combustíveis marítimos (OCM) com evidência para os terminais da Região Sudeste (Santos, São Sebastião, Ilha d'Água e Angra dos Reis) que juntos, representaram 54%, em 2024 [14] [15].

⁶ Refere-se à movimentação no TA apenas no modo aquaviário, considerando recepção e entrega de OCM.

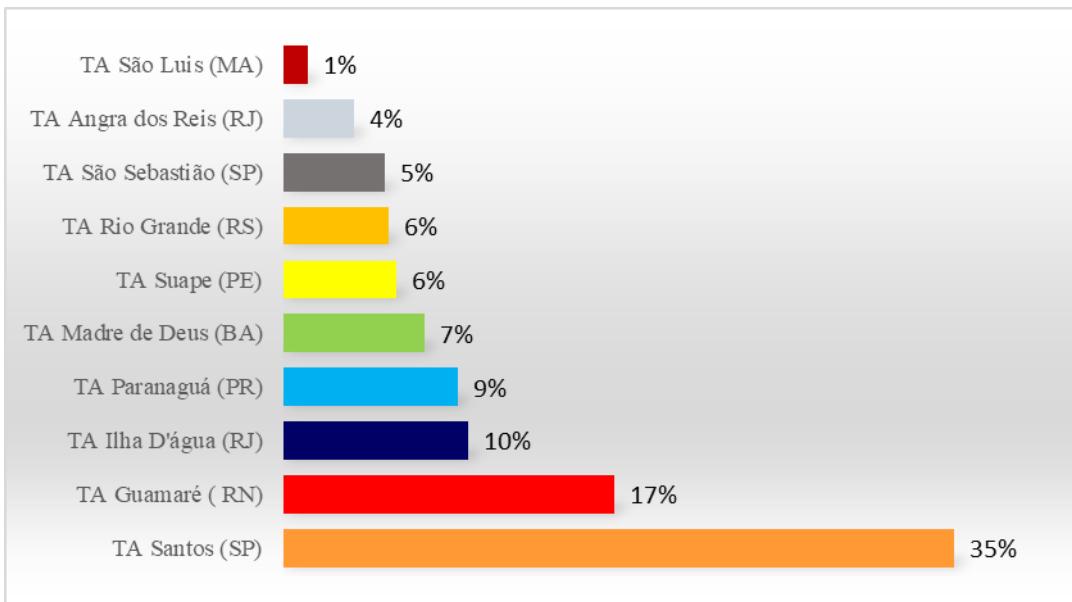


Figura 10 - Participação dos terminais aquaviários na movimentação de óleo combustível marítimo (2024) [14] [15].

Importante destacar o crescimento de 40% (2023) das operações de transbordo denominadas ship-to-ship (STS) - transferência de carga de uma embarcação para outra em mar aberto - refletindo o crescimento do mercado de exportação de petróleo, a demanda por combustíveis e a importação de gás natural para geração térmica. As operações STS, incluem ainda o bunkering, que é a operação de abastecimento por combustível marítimo, para consumo e propulsão das embarcações, o que amplia a eficiência e a capacidade de abastecimento marítimo [16].

3. Regulação da Organização Marítima (IMO) para o Transporte Marítimo Internacional

A IMO é uma agência especializada da ONU responsável por melhorar a segurança do transporte marítimo e prevenir a poluição provocada pelos navios.

Segundo DNV, o ano de 2023 foi bastante relevante para o transporte marítimo internacional, especificamente no que diz respeito aos avanços das regulamentações da Organização Marítima Internacional [17]. A 80ª sessão do Comitê de Proteção do Meio Ambiente Marinho da IMO (MEPC 80) adotou uma estratégia revisada para os GEE, com o objetivo de reduzir significativamente as emissões, provenientes do transporte marítimo internacional como ilustrado na Figura 11. As novas metas incluem uma redução de 20% das emissões até 2030, almejando 30%, em comparação com 2008, uma redução de 70% até 2040, visando 80%, e atingir “emissões líquidas zero” até 2050. A expectativa é que esses novos regulamentos entrem em vigor em meados de 2027 [18].

Outrossim, segundo a IMO, o comprometimento de todos estados-membros, no contexto da estratégia revisada, deve promover uma transição justa e equitativa, com apoio aos países em desenvolvimento, em especial, os países menos desenvolvidos (LDCs, sigla em inglês) e os pequenos estados insulares em desenvolvimento (SIDS, sigla em inglês) [19].

A decisão da Organização Marítima Internacional (IMO) de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa até 2050, implica que a futura frota mundial terá de contar com uma gama mais ampla de combustíveis e adotar novas soluções de propulsão e medidas de eficiência energética [18].

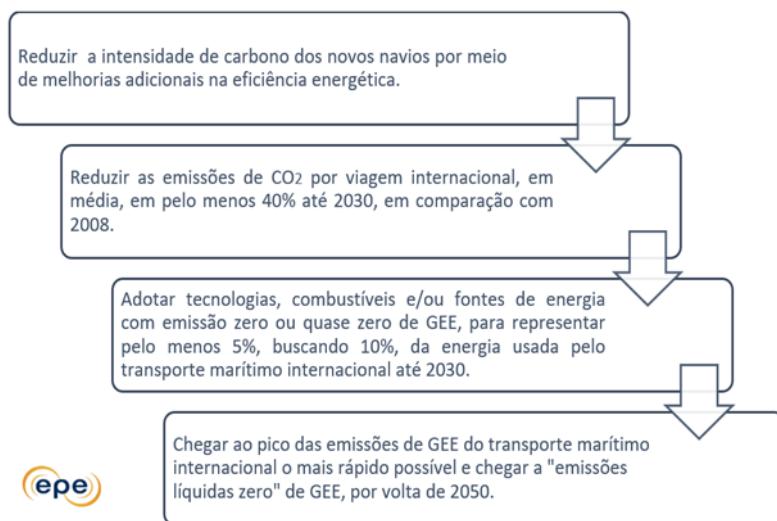


Figura 11 - Principais pontos da estratégia revisada da IMO 2023 [17]

As diretrizes adotadas pela IMO, em 7 julho 2023, conforme Anexo 14 da Resolução MEPC.376(80), fornecem orientações sobre a avaliação da intensidade de emissões de gases de efeito estufa do ciclo de vida de todos os combustíveis e visam abranger todo o ciclo de vida do combustível (com limites específicos), desde a extração/cultivo/recuperação de matéria-prima, conversão de matéria-prima em combustível, transporte, bem como distribuição/abastecimento e utilização de combustível a bordo de uma embarcação. Estas diretrizes também especificam temas/aspectos de sustentabilidade para combustíveis marítimos e definem um rótulo de ciclo de vida do combustível (FLL - Fuel Lifecycle Label), que contém informações sobre o tipo de combustível, matéria-prima (seu tipo e natureza, fonte de carbono), processo de conversão/produção (tipo de processo e energia utilizada no processo), fatores de emissão de GEE, informações sobre misturas de combustíveis e temas/aspectos de sustentabilidade. Estas diretrizes especificam os elementos do FLL sujeitos a verificação/certificação e incluem um procedimento geral que define como o esquema/padrões de certificação podem ser identificados [20]. O escopo destas diretrizes é abordar a intensidade emissões de GEE do poço ao tanque (WtT – well-to-

tank), do tanque à esteira/hélice (TtW – tank-to-wake) e do poço à esteira/hélice⁷ (WtW – well-to-wake) e temas/aspectos de sustentabilidade relacionados aos combustíveis navais/ portadores de energia (por exemplo, eletricidade para energia em terra) utilizados para propulsão de navios e geração de energia a bordo Figura 12. Os GEE relevantes incluídos são o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O) [20].

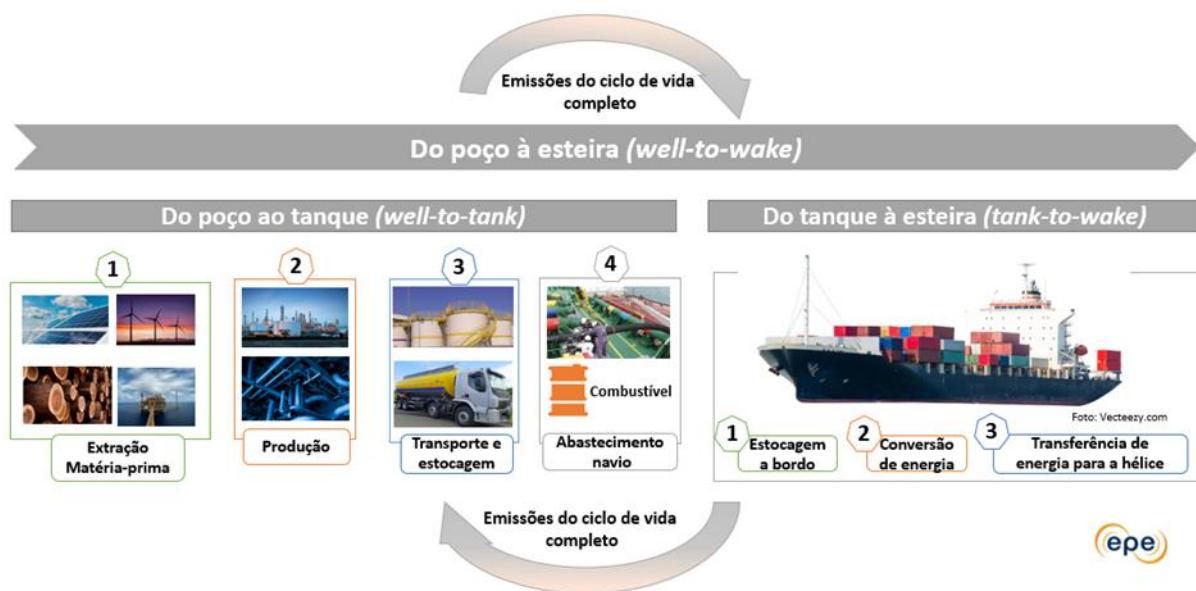


Figura 12 - Ciclo de vida completo (well-to-wake) dos combustíveis marítimos [21]

A abordagem well-to-wake é fundamental para avaliar as emissões de gases de efeito de estufa (GEE) de todo o ciclo de vida dos combustíveis marítimos. Ao compreender as etapas e os desafios da monitorização das emissões, as partes interessadas do setor marítimo podem obter uma visão abrangente do seu impacto, bem como dos seus parceiros. Embora a utilização do combustível a bordo possa emitir pouco ou nenhum GEE, o próprio processo de produção (por exemplo) pode ter um grande impacto ambiental [21].

A abordagem tank-to-wake leva em consideração somente as emissões resultantes da queima ou utilização do combustível a bordo da embarcação. A forma como um combustível é produzido e transportado para chegar ao tanque de uma embarcação não está incluída nesta análise. Portanto, para se qualificar como um combustível neutro em carbono, o combustível deve ter zero emissões no escapamento do navio. Assim, neste

⁷ A tradução literal é do poço à esteira, sendo esteira o rastro de espuma derivado do movimento subsequente à passagem da embarcação naquele espaço marítimo ou lacustre. O significado desta definição de requisitos é que a análise de emissões deve percorrer o ciclo do início (poço) ao fim (esteira, que representa o momento imediato após uso do combustível em ambiente aquático).

contexto, a propulsão à bateria elétrica e/ou a hidrogênio poderia ser enquadrada na abordagem tank-to-wake. Um combustível como o gás natural renovável, que pode ser negativo em carbono ao longo do seu ciclo de vida, não seria qualificado como neutro em carbono utilizando esta abordagem, uma vez que emite GEE no processo de abastecimento e queima no navio. Também todo o hidrogênio, quer seja produzido a partir de gás natural ou de eletricidade renovável, seria visto como um combustível neutro em carbono porque não libera GEE quando é utilizado em uma embarcação. Embora os combustíveis neutros em carbono, como o hidrogênio, produzam zero emissões no escape dos navios, a forma como o hidrogênio é produzido tem um grande impacto nas emissões do seu ciclo de vida. Utilizando a abordagem de well-to-wake, o hidrogênio verde (produzido a partir de fonte eólica ou solar) seria considerado um combustível neutro em carbono, o que não ocorreria com o hidrogênio cinza (proveniente de gás natural fóssil) [22].

A IMO, para fornecer um quadro regulamentar, implementou as seguintes medidas como parte da MARPOL⁸, para atingir as metas da estratégia inicial [23]:

- EEDI - Índice de Design de Eficiência Energética: Novos navios devem ser construídos e projetados para serem mais eficientes em termos energéticos. As medidas de eficiência típicas incluem: otimização da propulsão, otimização do motor, tecnologias energeticamente eficientes e limitação de potência do motor. A IMO não especifica como os navios devem cumprir as metas do EEDI. Desde que o nível de eficiência energética exigido seja alcançado, os projetistas de navios e os estaleiros são livres para explorar qualquer tecnologia ou solução de projeto que atenda à conformidade.
- SEEMP - Plano de Gestão de Eficiência Energética de Navios: Uma ferramenta prática para ajudar os armadores a gerenciarem seu desempenho ambiental e melhorar a eficiência operacional. O SEEMP exige que os proprietários e operadores considerem e implementem novas tecnologias e práticas para otimizar o desempenho do navio. Exemplos típicos de melhoria da eficiência operacional e da redução da intensidade de carbono incluem: otimização de velocidade, roteamento meteorológico, monitoramento e manutenção do casco e instalação de sistemas de recuperação de calor.

O SEEMP consiste em três partes:

⁸ A Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL73/78) é a principal convenção internacional que abrange a prevenção da poluição do ambiente marinho por navios por causas operacionais ou accidentais. Criada em 2 de novembro de 1973 na IMO e alterada por meio do Protocolo de 1978, em resposta a uma série de acidentes com petroleiros em 1976-1977. A MARPOL inclui atualmente seis anexos técnicos. Áreas Especiais com controles rígidos sobre descargas operacionais estão incluídas na maioria dos Anexos [100].

- 1) Parte I: Plano de gestão do navio para melhorar a eficiência energética - é obrigatória e deve ser mantida a bordo de todos os navios com arqueação bruta superior a 400 AB (Arqueação Bruta em toneladas);
- 2) Parte II: Plano de coleta de dados sobre consumo de óleo combustível em navios - é obrigatória para todos os navios acima de 5000 AB como parte do Sistema de Coleta de Dados;
- 3) Parte III: Plano operacional de intensidade de carbono do navio - é necessária para todos os navios sujeitos ao Indicador de Intensidade de

Carbono (CII) – ou seja, navios de carga, Ro-Pax e navios de cruzeiro de passageiros acima de 5000 AB⁹.

- EEXI - Índice de Eficiência Energética dos Navios Existentes: O EEXI aplica muitos dos mesmos requisitos de projeto que o EEDI, com algumas adaptações em relação ao acesso limitado aos dados de projeto. O EEXI é uma medida relacionada com o projeto técnico de um navio. Os navios têm de obter a aprovação EEXI, o mais tardar até à primeira vistoria periódica (2023). O valor EEXI exigido é determinado pelo tipo de navio, por sua capacidade e pelo princípio de propulsão e, é o valor EEXI máximo aceitável alcançado. O EEXI alcançado deve ser calculado para cada navio.
- DCS - Sistema de Coleta de Dados de Consumo de Óleo Combustível: A coleta de dados para o DCS começou em 1 de janeiro de 2019. O DCS agrupa dados como consumo de combustível, distância percorrida e horas de navegação para navios a partir de 5000 AB (arqueação bruta). Os dados agregados do DCS constituem a base para a classificação CII (Indicador de Intensidade de Carbono) e para o SEEMP Parte III.
- CII - Indicador de Intensidade de Carbono: é uma medida da eficiência energética de um navio e é dado em gramas de CO₂ emitido por capacidade de carga e milha náutica. O primeiro ano da verificação do CII operacional ocorreu em 2024, com base na operação do ano 2023. As embarcações, de acordo com o seu desempenho, receberão uma classificação ambiental de A (superior maior), B (superior menor), C (moderado), D (inferior menor) ou E (inferior). Os limites de classificação tornar-se-ão cada vez mais rigorosos em 2030, de acordo com a Figura 13. No caso de uma classificação D por três anos consecutivos ou uma classificação E, o SEEMP Parte III deve ser atualizado com um plano de ação corretiva e verificado antes que o SoC possa ser emitido. O plano de ação corretivo deve consistir numa análise da razão pela qual o CII exigido não foi alcançado e incluir um plano de implementação revisto.

⁹ Desde 1º de janeiro de 2023, o SEEMP Parte III está sendo verificado a bordo de navios maiores que 5.000 AB.

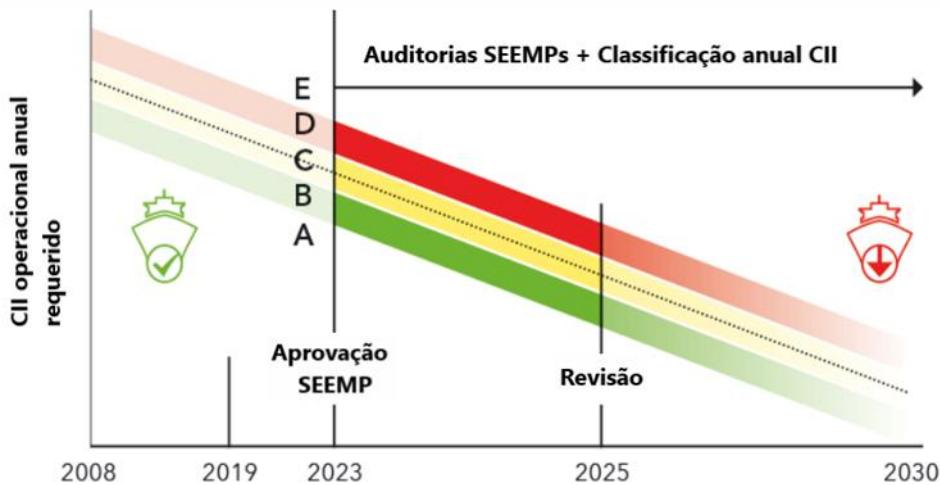


Figura 13 - Limites de classificação anual do Indicador de Intensidade de Carbono (CII) [23]

Embora 2023 tenha despontado com dois novos regulamentos importantes da IMO (EEXI e CII), as iniciativas ambientais não são novas para a indústria naval, conforme pode ser visto no Quadro 1, que apresenta um cronograma histórico e futuro das principais ações [21].

Quadro 1 - Cronograma das principais ações da IMO [21]

2006 ÁREA DE CONTROLE DE EMISSÃO (ECA)	ECAs são áreas marítimas onde foram estabelecidos controles mais rigorosos em torno das emissões atmosféricas dos navios. A IMO designou várias áreas marítimas importantes como ECAs, limitando principalmente as emissões de óxidos de enxofre (SO_x) e óxidos de nitrogênio (NO_x) provenientes dos escapes dos navios, mas também de material particulado (MP) e outras substâncias que destroem a camada de ozônio. O teor de enxofre foi limitado a 1,5%. Outros países/regiões também criaram as suas próprias ECAs, por exemplo a Coreia do Sul. Em 2006, o Mar Báltico tornou-se a primeira ECA da IMO em vigor.
2007 ECA MAR DO NORTE	O Mar do Norte torna-se a segunda ECA da IMO em vigor.
2012 ECA AMÉRICA DO NORTE	A terceira ECA entra em vigor, abrangendo as costas dos EUA e do Canadá, com teor de enxofre de no máximo 1,0% (reduzido em 2010). Também em 2012, foi reduzido o limite global do teor de enxofre do bunker, de 4,5% para 3,5%.
2013	O Índice de Projeto de Eficiência Energética (EEDI) torna-se obrigatório para novos navios. Esta medida técnica promove equipamentos e motores mais eficientes em termos energéticos. O Plano de Gestão da Eficiência

EEDI E SEEMP	Energética dos Navios (SEEMP) torna-se obrigatório para todos os navios. Esta medida operacional fornece uma abordagem para a gestão do desempenho da eficiência dos navios e da frota ao longo do tempo, utilizando indicadores como ferramentas de monitorização.
2014 ECA EUA-CARIBE	A quarta ECA entra em vigor, abrangendo as águas caribenhas dos EUA.
2015 O ACORDO DE PARIS	Tratado internacional para limitar o aumento da temperatura média global neste século abaixo de 2°C, acima dos níveis pré-industriais, através da redução das emissões globais de gases com efeito de estufa (GEE).
2016 IMO MEPC 69	Em outubro de 2016, é aprovado o roteiro da IMO para o desenvolvimento de uma estratégia de redução de emissões, que foi totalmente adotada em 2018.
2018 IMO MEPC 72 ESTRATÉGIA INICIAL DE GEE	Estabelece as três principais metas de emissões para a indústria naval através de medidas a curto, médio e longo prazo. As metas são: 1) reduzir a Intensidade Média de Carbono (emissões de CO ₂ por unidade de “trabalho” de transporte) do transporte marítimo internacional em pelo menos 40% até 2030 ; 2) em pelo menos 70% até 2050; 3) reduzir o total anual das emissões de GEE provenientes do transporte marítimo internacional em pelo menos 50% até 2050, tudo em relação a uma linha de base de 2008.
2019 OS PRINCÍPIOS DE POSEIDON	Juntamente com a regulamentação, foram formalizados vários compromissos voluntários, incluindo os Princípios Poseidon, que fornecem um quadro global de referência para avaliar e divulgar o alinhamento climático de portfólios de financiamento de navios.
2020 IMO 2020	Conhecido como IMO 2020, o limite global para o teor de enxofre do <i>bunker</i> foi reduzido de 3,5% para 0,5%. Isto resultou numa queda estimada de 77% nas emissões de óxidos de enxofre (SO _x) dos navios. Para cumprir este regulamento, alguns navios passaram a utilizar combustíveis compatíveis, incluindo óleo combustível com “muito baixo teor de enxofre” (VLSFO, sigla em inglês), outros foram equipados com purificadores (<i>scrubbers</i>) para lavagem dos gases de escape.
2020 A CARTA DE CARGA MARÍTIMA	Desenvolvido por um grupo diversificado de proprietários de carga, este compromisso voluntário fornece uma estrutura global para avaliar e divulgar o alinhamento climático das atividades de fretamento em todo o mundo. A Carta é consistente com as metas de GEE da IMO para o transporte marítimo. É aplicável a afretadores de navios a granel e conta com o compromisso de mais de 30 afretadores e operadores líderes globais.
2023 EEXI E CII	Entrada em vigor de medidas de curto prazo em matéria de GEE da IMO, que envolvem normas técnicas mínimas de eficiência energética (EEXI) específicas para cada segmento e um programa anual de classificação de navios para a redução da Intensidade de Carbono (CII) com base no desempenho operacional.

2023 MEPC80	Uma revisão mais forte da estratégia de 2018. Esta nova estratégia prevê uma transição justa e equitativa e estabelece expectativas para o setor e futuras medidas políticas para lutar por reduções de 30% de GEE até 2030, 80% de reduções de GEE até 2040 e uma ambição geral de atingir o “zero líquido” o mais próximo de 2050, e o mais rápido possível.
2024 RCLE-UE	Inclusão do transporte marítimo no Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (EU ETS). Os operadores comerciais de navios com mais de 5.000 AB serão obrigados a devolver licenças de emissão (EUAs) todos os anos (a partir de 2025) para cobrir as suas emissões relevantes de CO ₂ do ano anterior, com custos faseados ao longo de 3 anos. Embarcações <i>offshore</i> com mais de 5.000 AB serão incluídas a partir de 2027. O RCLE-UE é um sistema de "cap-and-trade" de emissões em que uma quantidade limitada de licenças de emissão é leiloada todos os anos para serem comercializadas, sendo este limite reduzido todos os anos de acordo com o Meta da UE de redução líquida de 55% (<i>Fit for 55</i>) das emissões de GEE até 2030 e de neutralidade climática até 2050.
2025 FUEL EU MARITIME e 5 ^a ECA	A proposta <i>Fuel EU Maritime</i> , parte do pacote “ <i>Fit for 55</i> ” da UE de políticas climáticas fundamentais. O regulamento proposto introduz limites cada vez mais rigorosos à intensidade de GEE da energia utilizada por navios comerciais com mais de 5.000 AB, nos portos da UE e nas viagens entre portos da UE, impulsionando uma maior utilização de combustíveis alternativos. A intensidade de GEE da energia utilizada será avaliada numa base “ <i>well-to-wake</i> ” e a proposta inicial exige uma melhoria de 2% em 2025 em relação a 2020, aumentando para 75% até 2050. Foi confirmada a 5 ^a ECA IMO que cobrirá o Mar Mediterrâneo.
2026 REVISÃO EEXI E CII	O Comité de Proteção do Meio Ambiente Marinho (MEPC) analisará a eficácia da implementação dos requisitos CII e EEXI até 1 de janeiro de 2026, e, se necessário, desenvolverá novas alterações para cumprir as metas de redução. Outras “medidas de médio prazo” poderão ser adotadas para reforçar ou substituir o CII. O CII é atualmente medido em intensidade de carbono e, portanto, não está em conformidade com as metas atualizadas de redução de GEE da IMO. É provável que a métrica utilizada seja atualizada e, portanto, a forma como ela é aplicada.
2028 REVISÃO DA ESTRATÉGIA DE REDUÇÃO DE GEE DA IMO	A estratégia de redução de GEE da IMO deverá ser revista em 2028 e, posteriormente, a cada 5 anos, a fim de atingir as metas previstas para 2040 e 2050. Em 2028, tal como ocorreu em 2023, haverá uma melhor compreensão para avaliação das medidas propostas, com possibilidade de alterações. ., é ocorram,
2030 PRAZO PREVISTO DA IMO	Até 2030, as emissões totais de GEE da indústria marítima devem ter sido reduzidas em pelo menos 20% (visando 30%), em comparação com os níveis de 2008, garantindo que continue a sua progressão em direção aos objetivos de 2040 e 2050. Até 2030, a adoção de tecnologias, combustíveis e/ou fontes de energia com emissões nulas ou quase nulas de GEE deverá representar pelo menos 5% (visando atingir 10%), da energia utilizada pelo transporte marítimo.

2040 PONTO DE VERIFICAÇÃO INDICATIVO	A IMO introduz um ponto de verificação indicativo para garantir a progressão em direção às metas de 2050. Até 2040, a indústria deverá ter reduzido as emissões totais de GEE em pelo menos 70% (visando atingir 80%), em comparação com 2008.
2050 LÍQUIDO ZERO	No MEPC80 (2023), uma revisão da estratégia de 2018, adotou uma nova meta ambiciosa definida para atingir o pico das emissões de GEE do transporte marítimo internacional o mais rápido possível e atingir emissões líquidas zero de GEE até 2050 ou próximo disso, tendo em conta diferentes circunstâncias nacionais.

A IMO mantém constantes discussões sobre o desenvolvimento das estratégias adotadas. Reuniões periódicas são realizadas entre os grupos de trabalho dos estados-membros, culminando com sessões específicas, na sede da IMO, para tomada de decisões.

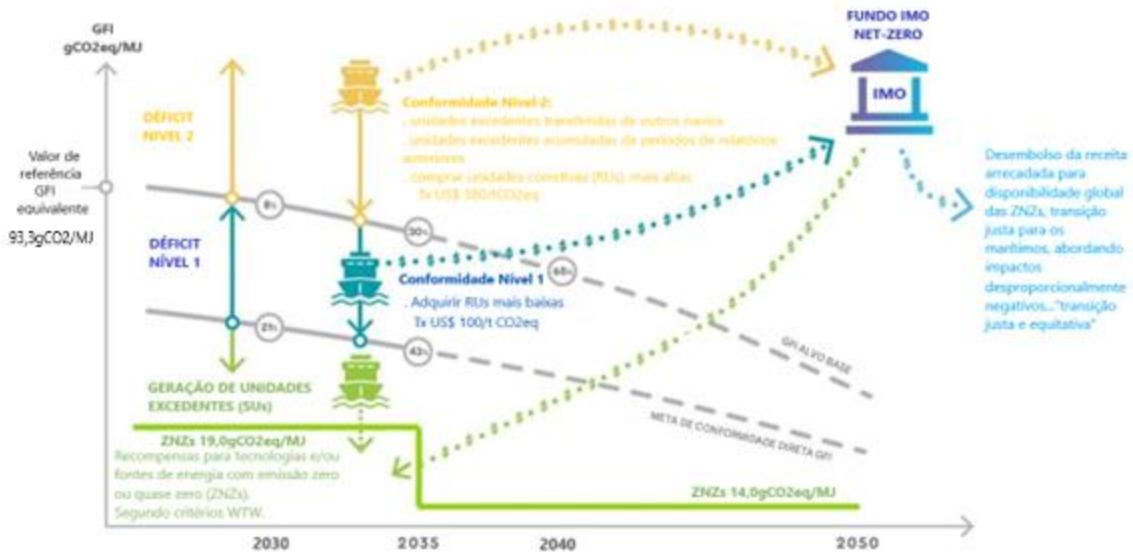
A 83ª sessão do Comitê de Proteção do Meio Ambiente Marinho (MEPC 83), ocorrida em abril de 2025, avançou significativamente na definição de um marco regulatório global (Quadro Net-Zero)¹⁰ para alcançar emissões líquidas zero até 2050, no setor do transporte marítimo [24]. De acordo com o projeto de regulamentação as embarcações deverão atender:

- a. Padrão global de combustível – os navios devem reduzir, ao longo do tempo, sua intensidade anual de emissão de gases de efeito estufa - GFI (em inglês Greenhouse Gas Fuel Intensity) – ou seja, a quantidade de GEE emitida para cada unidade de energia utilizada (calculado usando abordagem do poço à esteira (WTW));
- b. Medida econômica global – os navios que emitem acima dos limites de GFI terão que adquirir unidades corretivas (RUs) para equilibrar suas emissões deficitárias, enquanto aqueles que usam tecnologias de GEE zero ou quase zero (ZNZs) serão elegíveis para recompensas financeiras.

Essas medidas deverão ser adotadas formalmente em outubro de 2025, com previsão de vigência em 2027, tornando-se obrigatórias para navios com arqueação bruta superior a 5000 toneladas - responsáveis por 85% do total de emissões de CO₂ do transporte marítimo internacional [24].

Para garantir a conformidade com o GFI, foram estabelecidos dois níveis (Tiers) de metas de Intensidade de GEE do Combustível: uma Meta Base (Nível 2) e uma Meta de Conformidade Direta (Nível 1), na qual os navios seriam elegíveis para ganhar Unidades Excedentes (SUs) de acordo com a Figura 14 [25].

¹⁰ O Quadro Net-Zero será incluído em um novo capítulo (Capítulo 5 do Anexo VI - Prevenção da poluição do ar por navios) da Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL) [24].



Nota: Representação de alto nível do Mecanismo GFI Nível 2 da IMO, sob o Anexo VI da MARPOL, sujeito aos critérios e regulamentos das emendas do Quadro Net-Zero IMO.

Figura 14 - Intensidade de GEE do Combustível– Esquema simplificado do mecanismo de conformidade de dois níveis [25]

A partir de 2028, esses navios precisarão calcular sua intensidade de GEE do combustível (GFI), em relação a um valor de referência (93,3 gCO_{2eq}/MJ), com metas de redução obrigatórias em dois níveis:

- Meta Base / Nível 2 a 8% em 2030, 30% em 2035 e 65% em 2040;
- Meta de Conformidade Direta / Nível 1 à 21% em 2030, 43% em 2035

Os navios cujo GFI esteja acima dos limites estabelecidos podem equilibrar o seu déficit a partir de: (i) transferência de SU de outros navios; (ii) utilizando SUs acumulados; (iii) utilizando RUs adquiridas por meio de contribuições ao Fundo Net-Zero da IMO. Já os navios que utilizam tecnologias e/ou fontes de energia ZNZs, com um valor limite de 19 gCO_{2eq}/MJ até 2035, habilitam-se a um sistema de recompensa que direciona as receitas para a implantação dessas tecnologias, facilitando uma transição justa mitigando impactos desproporcionais [25].

Segundo a IMO [24], o Fundo Net-Zero será criado para arrecadar contribuições para a precificação das emissões. Essas receitas serão então desembolsadas para:

- Recompensar navios de baixa emissão;
- Apoiar inovação, pesquisa, infraestrutura e iniciativas de transição justa em países em desenvolvimento;
- Financiar a formação, a transferência de tecnologia e o reforço de capacidades para apoiar a Estratégia de GEE da IMO; e

- Mitigar impactos negativos em Estados vulneráveis, como Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento e Países Menos Desenvolvidos.

É importante destacar que a MECP 83 discutiu ainda, uma série de questões relacionadas à proteção do ambiente marinho contra atividades de transporte marítimo conforme Quadro 2 [24].

Quadro 2 - Outros resultados obtidos da MEPC 83 [24]

Adoção do Plano de Ação 2025 para combater o lixo plástico marinho
Progresso na revisão da Convenção sobre Gestão de Águas de Lastro
Aprovação de uma proposta para designar o Atlântico Nordeste como uma Área de Controle de Emissões e acordo em princípio para designar duas novas Áreas Marítimas Particularmente Sensíveis na costa do Pacífico da América do Sul
Aprovação do projeto de Plano de Trabalho para o desenvolvimento de um quadro regulamentar para a utilização de sistemas de captura e armazenamento de carbono a bordo (OCCS)
Aprovação de projetos de alterações ao regulamento 27 do Anexo VI da MARPOL relativo à acessibilidade do Sistema de Recolha de Dados da IMO
Adoção de alterações às Diretrizes de 2021 sobre os fatores de redução da intensidade de carbono operacional em relação às linhas de referência (diretrizes de fatores de redução CII, G3)
Aprovação de um novo resultado para desenvolver um quadro juridicamente vinculativo sobre a gestão da bioincrustação, a fim de prevenir a propagação de espécies aquáticas invasoras nocivas

Informações complementares sobre regulamentações aplicadas ao transporte marítimo, na União Europeia (EU), Estados Unidos (EUA) e China podem ser consultadas no Apêndice A desta Nota Técnica.

4. Sistemas de Propulsão Marítima

A propulsão marítima refere-se aos métodos de propulsão de navios na água. No caso da propulsão marítima, o dispositivo de propulsão aplica uma força na água ou no ar circundante para criar uma força de reação na embarcação e empurrá-la na direção necessária. Diferentes sistemas de propulsão podem ser utilizados, dentre os quais: propulsão a vapor, motores a diesel, propulsão diesel-elétrico, propulsão eólica, propulsão nuclear, propulsão de turbina a gás, entre outras [26].

4.1 O Motor Diesel

Os motores diesel são o tipo de sistema de propulsão mais comumente utilizado nos navios. Eles são usados como motores principais e auxiliares e funcionam com muito mais eficiência do que as turbinas a vapor [26].

O motor diesel foi inventado por Rudolf Diesel em 1892, com projeto inicialmente voltado para a queima de carvão pulverizado. A evolução ao longo do tempo, levou ao projeto de um motor mais compacto, de maior eficiência, com menor emissão de poluentes, e apto para operar com uma ampla faixa de combustíveis: do gás natural aos óleos pesados, sendo o óleo diesel o mais utilizado, embora os biocombustíveis venham ganhando interesse crescente de utilização [27]. O motor diesel é uma máquina de combustão interna (IC - Internal combustion) e opera segundo um ciclo de 4 fases de acordo com a Figura 15:

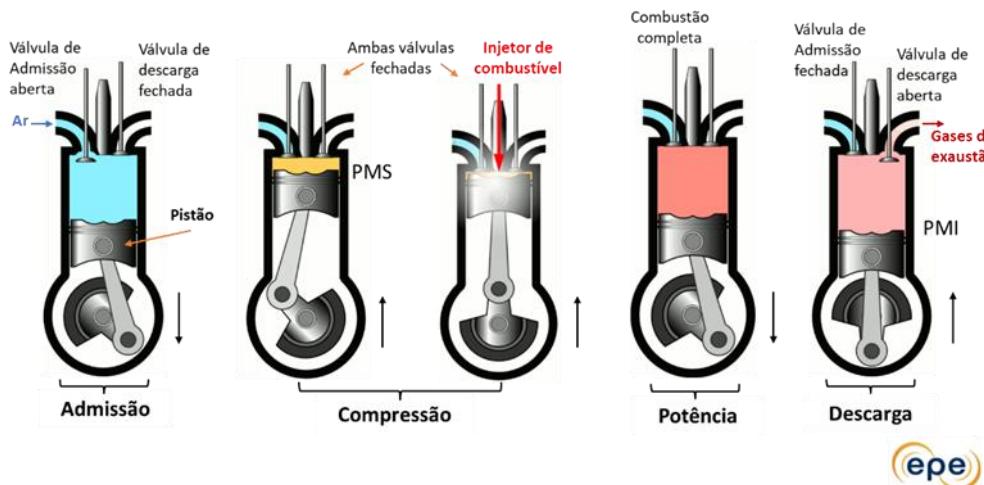


Figura 15 - Diagrama básico de funcionamento do motor ciclo diesel

- 1) **Admissão** – com a válvula de descarga fechada e a válvula de admissão aberta, o ar é introduzido no cilindro, deslocando o pistão em um movimento descendente;
- 2) **Compressão** – com ambas as válvulas fechadas, o ar que foi aspirado é comprimido pelo pistão em um movimento ascendente, de acordo com a respectiva razão de compressão, alcançando temperaturas elevadas (500°C-800°C). O combustível é nebulizado por bicos injetores e introduzido pouco antes do pistão atingir o ponto morto superior (PMS). Devido à alta temperatura, o combustível vaporiza rapidamente e entra em combustão espontânea após um pequeno intervalo de tempo (0,2 ms a 0,8ms), denominado atraso ou retardo de ignição;

- 3) Potência – o combustível termina de queimar, aumentando ainda mais a pressão e temperatura dos gases, que se expandem, provocando um movimento descendente do pistão, até o ponto morto inferior (PMI);
- 4) Descarga – quando o pistão atinge o PMI, a válvula de descarga se abre e o pistão, em um movimento ascendente, empurra os gases da combustão para que sejam removidos da câmara. Após a fase de descarga, o processo do ciclo diesel se reinicia [27]

Os motores marítimos são motores térmicos utilizados para converter o calor gerado pela queima de combustível em trabalho útil, ou seja, desenvolver energia térmica e transformá-la em energia mecânica [26]. O conjunto pistão, biela e virabrequim é que transforma a energia térmica em energia mecânica. O movimento ascendente/descendente do pistão no cilindro, é transformado em movimento rotativo por meio da biela e virabrequim. O virabrequim é conectado por meio de um volante ao alternador ou a um arranjo de hélice para realizar o trabalho mecânico e impulsionar o navio, conforme Figura 16.

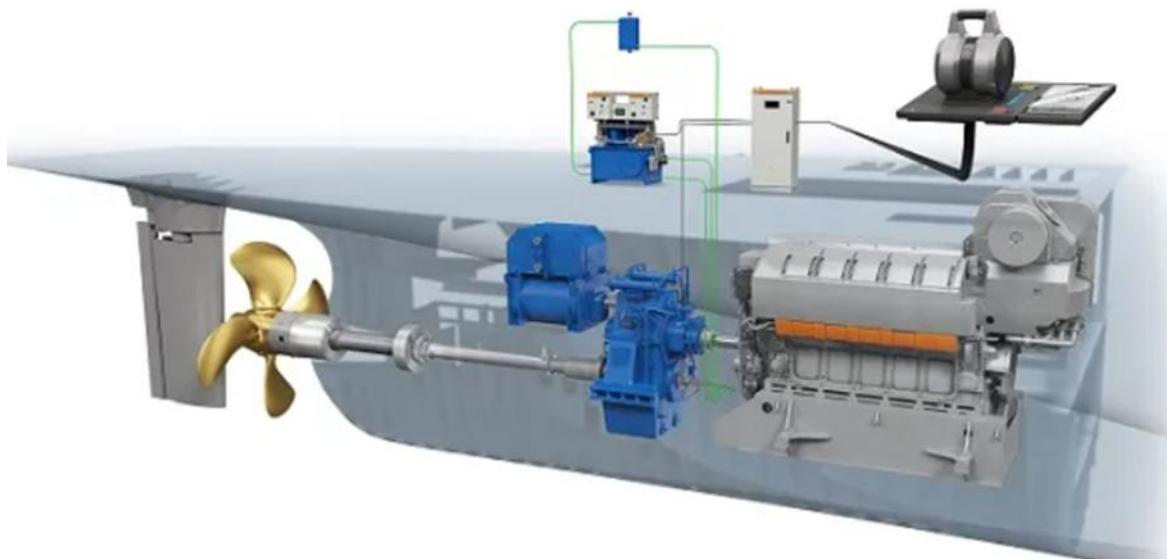


Figura 16 - Sistema de hélice acionado pelo motor do navio [28]

Quer se trate de um pequeno navio, que opera nas áreas costeiras, ou de um enorme navio, que navega em águas internacionais, um motor marítimo de 4 ou 2 tempos¹¹ é instalado a bordo do navio para fins de propulsão. Um motor de 4 tempos pode ser instalado para impulsionar o navio (geralmente em embarcações de pequeno porte) e para produzir energia elétrica. Neste motor, o pistão percorre as quatro fases,

¹¹ Embora uma série de inovações estejam sendo aplicadas aos 1.500 - 2.000 novos navios de dois tempos e 750 novos navios de quatro tempos que são lançados por ano, o maior desafio para alcançar reduções de GEE marítimos é para a frota mercante existente, que consiste em aproximadamente 55.000 navios com motores de dois tempos e 30.000 navios com motores de quatro tempos [32] [33].

correspondendo a duas voltas do virabrequim do motor, para que seja completado um ciclo. Os motores de 2 tempos são maiores em comparação com os motores de 4 tempos e realizam todo o processo do ciclo diesel em uma única volta do eixo do motor, ou seja, realiza as quatro fases em duas (admissão/compressão e potência/descarga) [29].

Os motores dos navios podem ser classificados quanto a sua velocidade. Muitos motores diesel de quatro tempos de velocidade média, operam a cerca de 500 rotações por minuto (rpm). Qualquer motor com velocidade operacional máxima acima de 1000 rpm, é classificado como alta velocidade. Em geral, motores com velocidade operacional abaixo de 300 rpm são classificados como lentos, embora a maioria dos grandes motores a diesel, de baixa velocidade e de 2 tempos, operem a 120 rpm. Ademais, alguns motores de navios de longo curso, tem velocidade máxima de 80 rpm. Os motores de 2 tempos têm alta relação potência/peso em comparação aos motores de 4 tempos, podendo transportar mais peso e, consequentemente, mais carga. Portanto, os maiores e mais potentes motores do mundo são motores ciclo diesel de baixa velocidade e de dois tempos [30].

4.2 Motor Dual Fuel (DF)

A conversão de navios de grande porte em motores de duplo combustível (bicombustível) é vista como uma das formas pelas quais a indústria marítima poderia atingir as suas metas de descarbonização. A adaptação de um motor convencional para bicombustível permite que um motor de navio funcione com um segundo combustível sustentável, desde que isso seja acompanhado por uma injeção piloto de combustível convencional. Embora este seja principalmente um combustível fóssil tradicional, também podem ser utilizados biocombustíveis sustentáveis ou combustíveis sintéticos. As conversões para motor bicombustível, exemplificado na Figura 17, já foram aplicadas para converter os navios transportadores de GNL e GLP para o combustível transportado. Isto resultou numa redução de aproximadamente de 15%-20% nas emissões de gases de exaustão¹², destacando o papel fundamental que ambos os combustíveis ocupam como combustíveis de transição.

¹² Para melhorar a eficiência energética das embarcações pode-se recuperar o calor contido nos gases de exaustão e produzir vapor para gerar energia elétrica ou mesmo aquecer água e ar para suprimento ao navio.

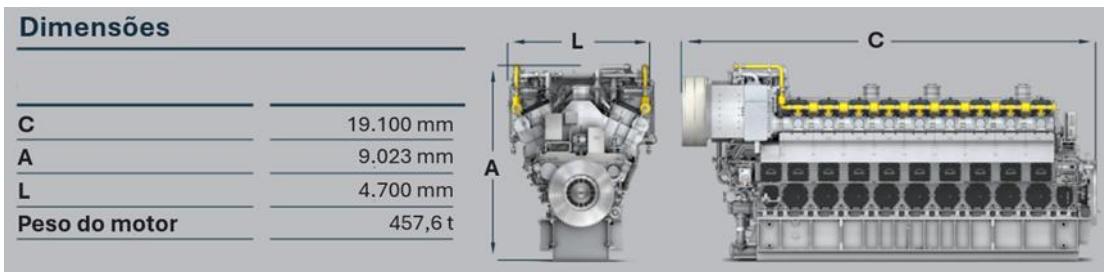


Figura 17 - Motor bicombustível MAN 51/60DF (bunker, diesel, GNL e biogás) [31]

Para atingir as metas de descarbonização, é necessário fazer conversões dos motores para bicombustível, que possam utilizar combustíveis sustentáveis conforme abordagem well-to-wake, como a amônia verde, o metanol verde e os combustíveis sintéticos [32] [33].

A conversão de um navio para bicombustível envolve mais do que simplesmente o motor. É necessário haver espaço para dois tanques de combustível separados. Também requer linhas de combustível associadas, sistemas de condicionamento que controlam pressão/temperatura e filtros para dois combustíveis diferentes. As precauções relacionadas com a segurança também precisam ser consideradas e implementadas, especialmente quando se trata de combustíveis com requisitos de armazenamento mais específicos. Depois, há o motor em si, que requer dois sistemas de injeção diferentes devido às propriedades específicas do combustível, incluindo níveis de pressão, diâmetros dos bicos e características de design do sistema de injeção [34].

De acordo com a DNV, os principais requisitos para modernização de navios com motores de dois tempos incluem motores controlados eletronicamente, a disponibilização de um pistão com diâmetro interno de pelo menos 50cm e a realização de um teste no mar (sea trial).

O custo da modernização, incluindo o sistema de armazenamento e abastecimento de combustível, varia entre 5 milhões e 15 milhões de dólares, dependendo do tipo de combustível e, como regra geral, não deve exceder 25% do custo associado à construção de um novo navio para ser economicamente viável. Usualmente, um navio deve ter um custo mínimo de construção de cerca de 50 milhões de dólares para compensar uma modernização. Os navios que se enquadram nestes critérios incluem petroleiros acima de 50 mil TPB (tonelagem de porte bruto), graneleiros

acima de 160 mil TPB e porta contêineres acima de 7 mil TEU - twenty-foot equivalent unit (unidade equivalente a vinte pés), entre outros¹³ [32] [33].

Muitas encomendas de navios bicombustível já se encontram em curso, conforme pode ser visto no Apêndice B.

5. Novas Tecnologias

Novas tecnologias têm sido aplicadas e outras estão em desenvolvimento para ajudar no processo de descarbonização e mitigação das emissões GEE do transporte marítimo. A seguir, serão apresentadas algumas das tecnologias previstas ou já em testes em embarcações.

5.1. Células a Combustíveis

Novos tipos de conversores de energia integrados e eficientes poderiam reduzir as emissões de GEE em comparação com motores de combustão. Uma dessas tecnologias de conversor é a célula a combustível. Esses sistemas operam convertendo a energia química de combustíveis em energia elétrica através de reações eletroquímicas, obtendo assim maior eficiência energética quando comparados a motores a combustão. Eles podem ser produzidos utilizando diferentes materiais de membrana, o que condiciona suas condições e características de operação. Dentre eles, as células com membranas trocadoras de prótons (PEMFC) e as células de óxido sólido (SOFC) são aquelas com maior potencial para aplicações no segmento marítimo [35].

Células do tipo PEMFC se destacam pela maior maturidade tecnológica, sendo atualmente utilizadas em diversas aplicações estacionárias ou móveis. Esses equipamentos operam em temperaturas significativamente mais brandas, possuem maior potência específica e apresentam menor custo de investimento que células SOFC [35]. Entretanto, a tecnologia costuma possuir menor eficiência energética que a corrente e seu uso se limita à alimentação com hidrogênio de alta pureza, o que pode dificultar sua implementação em embarcações que viajam longas distâncias sem abastecimento. Sendo assim, são equipamentos mais adequados para uso em transporte de passageiros e/ou de pequeno porte. Algumas embarcações destes tipos já operam com células PEMFC, ainda que a penetração de mercado da tecnologia seja bastante incipiente até o momento [36]. O uso direto do hidrogênio

¹³ Em alguns casos, como no caso de navios que se adaptam para uso de metanol, este custo pode ser menor. Para motores de quatro tempos, navios com diâmetros grandes que realizaram testes no mar há 8 a 15 anos parecem ser os mais adequados para modernização com bicombustíveis [26].

liquefeito teve sua primeira utilização como combustível marítimo para um ferry na Noruega, onde MF Hydra instalou 400 kW de células a combustível (PEMFC) e um tanque de 80 m³ para hidrogênio liquefeito [17].

Células do tipo SOFC, por sua vez, tem tido visibilidade no mercado devido à capacidade de converter combustíveis diversos como amônia, GNL, metanol e hidrogênio em eletricidade, com uma eficiência energética potencialmente maior em comparação com motores de combustão interna. São equipamentos mais adaptados, assim, para uso em embarcações de longa distância quando comparados com Células do tipo PEMFC.

Atualmente, as células a combustível do tipo SOFCs tem CAPEX cerca de 10 vezes o de motores de combustão interna, por kW instalado, e têm uma vida útil muito mais curta. Testes laboratoriais indicam que as embarcações dotadas com células a combustível (SOFCs) podem atingir níveis significativamente mais elevados de eficiências do que os motores convencionais, mas isso ainda não foi demonstrado em um navio [17]. Neste sentido, alguns projetos experimentais começam a surgir, como a parceria entre as empresas Eidesvik e a Equinor, que juntas operam na exploração offshore de petróleo e gás natural, na Noruega. O projeto ShipFC é um retrofit do navio Viking Energy, da Eidesvik Offshore apresentado na Figura 18, com a instalação de módulos de células a combustível com potência total de 2MW [17] [37].



Figura 18 - Projeto amônia ShipFC para conversão de energia com base em amônia e célula combustível (SOFC) [37]

5.2 Sistemas de Propulsão Bateria-Híbrido

As baterias de íons-lítio têm tido um papel importante nas mudanças de vários setores industriais, incluindo o transporte marítimo e o setor offshore de petróleo e gás natural. Navios híbrido-elétricos e totalmente elétricos com sistemas de armazenamento de energia em bateria (BESS - battery energy storage systems) e sistemas de gestão de energia otimizados, contribuirão para reduzir as emissões e o consumo de combustível. Há expectativa que a implementação de soluções BESS também resulte na redução dos custos de manutenção e em melhorias no

desempenho operacional, além de aumento de segurança do navio [32]. As baterias fornecem propulsão com emissão zero (do tanque à esteira/hélice) e têm eficiência duas vezes maior que a de um gerador a diesel. Apresentam níveis de ruído mais baixos do que os sistemas de propulsão tradicionais, porém possuem baixa densidade energética e volumétrica. Nos últimos anos, observa-se a queda nos preços das baterias e um aumento significativo no desempenho. Ainda assim, a produção de baterias consome muita energia e o gasto de capital para um grande sistema de baterias é muito maior do que para um sistema de propulsão convencional [20]. As aplicações da bateria como fonte de propulsão de navios estão limitadas a certas classes de embarcações, como *ferries*, navios e plataformas de posicionamento dinâmico, rebocadores, navios de dragagem, navios de curto alcance, navios de apoio a parques eólicos etc. A implementação de BESS em navios de longo curso é tecnicamente possível, mas não seria viável do ponto de vista da análise custo-benefício. Esses navios, devido às suas necessidades energéticas e às longas viagens, provavelmente utilizarão outros combustíveis alternativos para cumprir o requisito de descarbonização estabelecido pela Organização Marítima Internacional [32].

5.3 Sistemas de Propulsão Assistidos Pelo Vento

As tecnologias do sistema de propulsão assistida pelo vento (WAPS - wind-assisted propulsion system) ganharam atenção significativa como meio de reduzir o consumo de combustível e as emissões dos navios. A propulsão assistida pelo vento pode proporcionar economias anuais de combustível entre 5% e 9% com capacidade para atingir 25%. Potencialmente, os ganhos podem ser maiores se as novas construções forem especificamente concebidas para transportar sistemas de vela. Ao combinar a tecnologia de propulsão assistida pelo vento com algoritmos de rotas meteorológicas e otimização logística (por exemplo, permitindo velocidades mais baixas), as vantagens da navegação podem ser ampliadas com o uso de rotas ideais para embarcações individuais. O interesse pela energia eólica provavelmente não conduzirá a um renascimento dos grandes veleiros, mas a energia eólica pode ser um complemento aos demais combustíveis alternativos. A atual tecnologia de propulsão assistida pelo vento depende de uma combinação de aerodinâmica avançada, automação, modelagem computacional e materiais modernos para desenvolvimento de uma nova geração de sistemas de vela inovadores para navios oceânicos. A maioria dos sistemas modernos utiliza controle e automação de última geração para operar com segurança, sem a necessidade de tripulação adicional [17]. Vários conceitos diferentes de tecnologia de navegação foram ou estão sendo desenvolvidos, incluindo: velas rígidas ou de asas macias, velas rotativas, folhas ventiladas e pipas. Um número considerável de grandes navios comerciais vem instalando velas rotativas que representam metade das instalações de sistemas de propulsão eólica. Em abril de 2023, a Vale (empresa mineradora no Brasil), recebeu

o navio Sea Zhoushan, um Guiabamax da categoria VLOC (Very Large Ore Carrier), com capacidade de 325 mil toneladas, equipado com sistema de velas rotativas, conforme pode ser visualizado na Figura 19.



Figura 19 - Navio minereiro da Vale, equipado com um sistema de velas rotativas [38]

5.4 Sistemas de Lubrificação a Ar

Os sistemas de lubrificação a ar (ALS – *air lubrication systems*) são modos de propulsão que podem reduzir o consumo de energia, uma vez que permitem a diminuição da resistência entre o casco e a água do mar através da injeção de ar ao longo da área plana do fundo de um navio, conforme Figura 20. A resistência de uma embarcação ao movimento através da água consiste em múltiplos componentes, dos quais a resistência ao atrito é a dominante. Para embarcações de deslocamento em baixa velocidade, a resistência ao atrito pode atingir 85% da resistência total. Os sistemas de lubrificação a ar injetam ar ao longo da área plana do fundo de um navio para reduzir o arrasto friccional¹⁴. A economia líquida de energia obtida com o uso de um sistema de lubrificação a ar é da ordem de 4% a 7% em condições climáticas normais de operação [17]. Observa-se uma forte adesão do setor marítimo na implementação do sistema de lubrificação a ar. De acordo

¹⁴ Devido à turbulência na camada limite, estabelece-se uma mistura de ar e água do mar. Quando uma camada de ar sustentada nesta mistura pode ser gerada sobre uma grande parte do fundo do navio, a redução do arrasto é maior do que se a camada de ar se quebrasse em manchas ou se as manchas se quebrassem em grandes bolhas. A redução do arrasto friccional depende da homogeneidade da mistura de ar e água do mar e da taxa de fluxo de ar ao longo da largura do fundo, ao longo do comprimento do navio, tornando a distribuição das unidades de liberação de ar que descarregam o ar, um fator importante.

com a DNV, até junho de 2023, foram reportados a existência de 347 navios equipados ou adaptados, com a tecnologia ALS¹⁵.

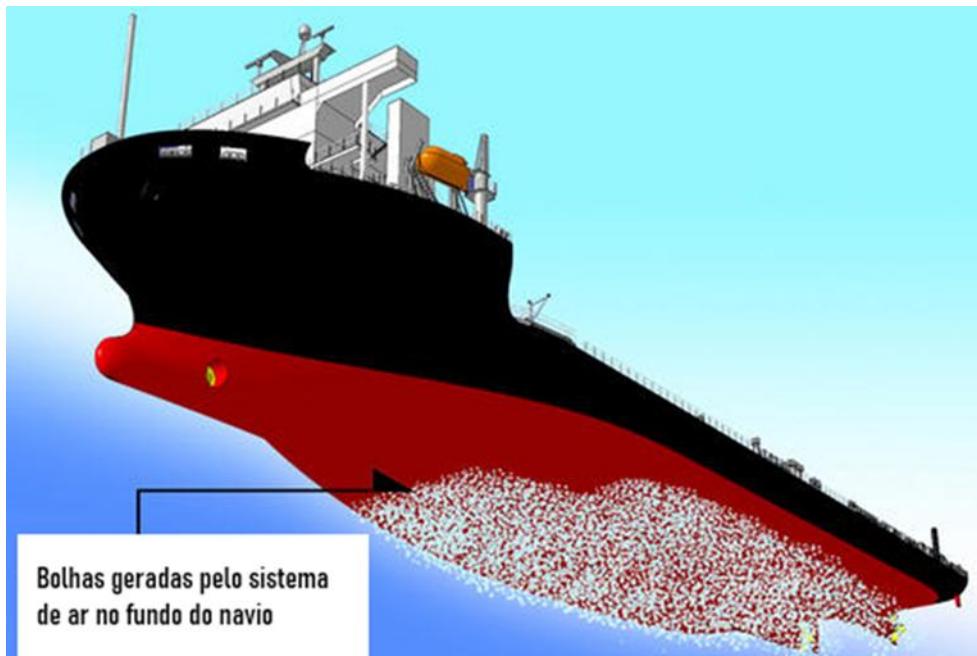


Figura 20 - Esquema ilustrativo do sistema de lubrificação a ar instalado no casco do navio [39]

5.5 Captura e Armazenamento de Carbono a Bordo

O conceito de captura e armazenamento de carbono a bordo (sigla em inglês - CCS) é baseado na tecnologia que captura o carbono dos gases de combustão, antes que o CO₂ seja emitido para a atmosfera, o que requer uma capacidade de armazenamento de CO₂ a bordo, bem como uma longa cadeia logística, que possa receber e armazenar o CO₂ permanentemente longe da atmosfera, permitindo uma operação neutra em carbono, sem a dependência do uso de combustíveis alternativos. O navio necessitará de: instalações de captura de carbono para remover o CO₂ dos gases de escape; planta de processamento para transformar o CO₂ capturado em um estado adequado para armazenamento; e instalações de armazenamento e descarregamento que permitem a descarga em terra ou em navios de transporte. Uma vez capturado e pronto para descarga, o armazenamento permanente bem-sucedido de CO₂ requer o desenvolvimento de

¹⁵ No Brasil, em junho de 2021, a Vale recebeu o primeiro minereiro do mundo com um sistema de lubrificação a ar, o Sea Victoria, um Guaibamax com capacidade para 325 mil toneladas. Dez compressores instalados no convés do navio enviam ar para 20 dispositivos posicionados sob o navio para produzir um tapete de bolhas. Estas bolhas reduzem o atrito entre o casco e a água, diminuindo o consumo de combustível e, consequentemente, as emissões [38].

uma infraestrutura de recepção ligada a uma rede de transporte de oleodutos ou navios para levar o CO₂ aos locais de armazenamento permanente [17].

Espera-se que o preço do carbono seja o principal impulsionador desta tecnologia, já que é razoável supor que a indústria de captura de CO₂ baseada em terra, impulsionará o desenvolvimento de grande parte desta cadeia logística, dado que os volumes que serão capturados em terra são muito maiores do que o produzido pelo transporte marítimo [17]. A redução de riscos e custos em toda a cadeia de valor é fundamental para a expansão da tecnologia CCS [40]. A Figura 21 ilustra uma infraestrutura para tecnologia CCS, envolvendo a captura de CO₂ (terra e mar), os sistemas de transportes (dutoviário e marítimo) e o armazenamento final, em reservatórios petrolíferos.

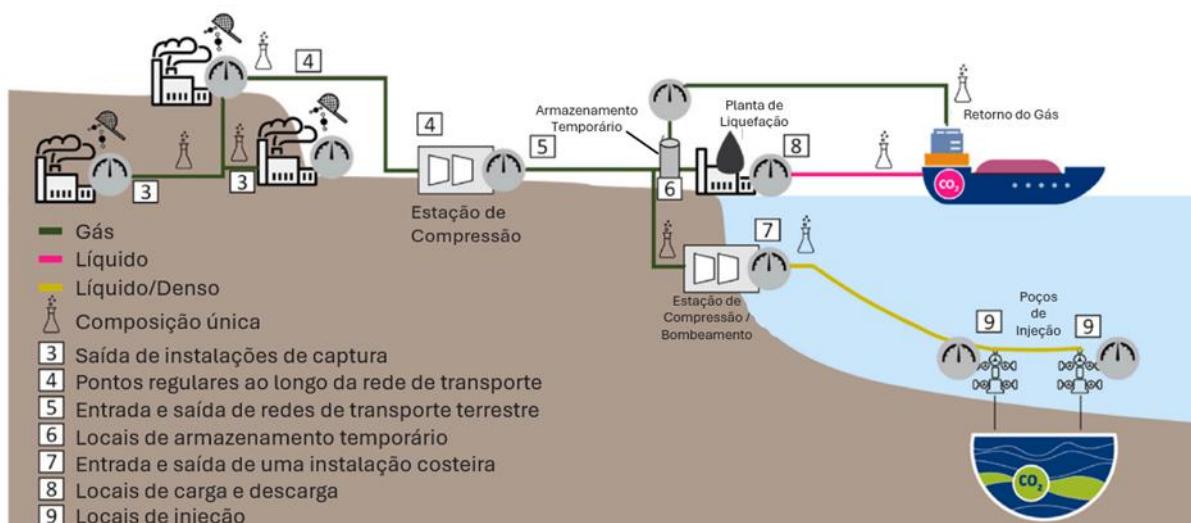


Figura 21 - Cadeia de valor do uso da tecnologia CCS [40]

As tecnologias de captura pós-combustão de CO₂ são baseadas em diferentes princípios, como absorção química, separação por membrana ou tecnologias de captura criogênica. O processo de absorção química, com o uso de aminas como solvente, é uma tecnologia madura, de ampla utilização no setor industrial, e por isso, é a opção mais indicada para o setor marítimo. A instalação de um sistema de captura de carbono, levará em conta: o custo de instalação da tecnologia de captura e armazenamento de carbono no navio, os custos operacionais adicionais e o consumo adicional de combustível necessários para executar o processo de captura e armazenamento de carbono a bordo e o custo da entrega do CO₂ capturado, às instalações de recepção [17].

5.6 Propulsão Nuclear

A utilização da energia nuclear no setor dos transportes marítimos não é nova, embora não tenha sido utilizada para a exploração em navios mercantes, ao longo

das principais rotas comerciais. O uso de quebra-gelos nucleares na remota região do Ártico para permitir o transporte durante as severas estações de inverno é uma prática bem conhecida, assim como de submarinos nucleares para fins militares. O interesse pela utilização da propulsão nuclear para uso no transporte marítimo comercial, ressurge como uma alternativa para a descarbonização do transporte marítimo [41].

A propulsão nuclear fornece as principais necessidades energéticas do navio, a partir de um reator nuclear a bordo, no qual a fissão controlada do combustível nuclear produz calor, que é extraído por meio de um refrigerante. O calor é utilizado para gerar energia, gerando vapor para acionar turbinas, para gerar eletricidade para propulsão elétrica ou para acionar um eixo para propulsão mecânica. A propulsão nuclear apresenta a vantagem de uma operação inherentemente neutra em carbono e considera longos intervalos de abastecimento, possivelmente alinhados com o cronograma de docagem ou mesmo com a vida útil do navio [17].

Bhattacharyya et al. [41] destacam que a indústria nuclear poderia apoiar a descarbonização no transporte marítimo, considerando cinco potenciais rotas:

- Navios com emissão zero via eletrificação, com eletricidade fornecida a partir de um micro ou pequeno reator nuclear modular (SMR) a bordo;
- Navios com emissão zero via eletrificação, com a eletricidade sendo derivada de reatores nucleares terrestres (localizados muito perto dos principais portos) e armazenada a bordo dos navios em baterias;
- Utilização de combustíveis com emissões zero através da produção assistida por energia nuclear de hidrogênio verde (armazenado a bordo) e da sua utilização como combustível através de motores de combustão ou em pilhas de células de combustível especialmente concebidas para o setor marítimo;
- Uso de combustíveis de emissões muito baixas, como amônia verde assistida por energia nuclear (usando hidrogênio nuclear da eletrólise da água com nitrogênio de usina de separação de ar assistida-nuclear) ou metanol verde (hidrogênio nuclear + CO₂ de captação direta de ar/captado de usinas térmicas em ponto de suporte nuclear) em motores de combustão ou células de combustível;
- Desenvolvimento de combustíveis de emissões líquidas zero através da produção/melhoramento de combustíveis/biocombustíveis sustentáveis com utilização de biomassa/óleos vegetais e calor nuclear, eletricidade e hidrogênio em instalações de cogeração nuclear terrestres.

Entre as rotas de maior potencial, cabe destacar a utilização e desenvolvimento de pequenos reatores modulares (SMRs – Small Modular Reactors). Os SMRs, com potência menor que 300 MW, surgem como alternativas para diminuir os custos de construção,

apresentam licenciamento menos complexo em relação às grandes centrais nucleares, podem ser produzidos em fábricas e transportados para regiões remotas, distantes dos centros de geração e transmissão de energia elétrica [42]. Os SMRs possuem algumas qualidades que se adaptam bem ao transporte marítimo, apresentando a potência de navios maiores. Vários dos SMRs são considerados de *design* seguro por não exigir controle ativo para evitar acidentes nucleares. Trata-se de um benefício significativo para o transporte marítimo, por não exigir uma tripulação grande e especializada para operar o reator nuclear. A partir de avanços regulatórios e maior aceitação da sociedade, a produção dos SMRs em maior escala ajudaria a reduzir os custos [17].

Mais de 80 projetos de SMR estão sendo desenvolvidos no mundo, com maior parcela nos EUA, cujo interesse maior, entretanto, é substituir centrais elétricas a carvão em terra. Ainda assim, os resultados dos testes dos SMRs para uso em terra, são importantes para poderem ser replicados a bordo dos navios. Ressalta-se que empresas da China e Coreia do Sul lideram o mercado da construção naval, seguidos por empresas do Japão, União Europeia e EUA [43].

Um exemplo de projeto de SMR para transporte marítimo é conduzido por um consórcio norueguês, em que participam autoridades marítimas, universidades, construtores navais e companhias marítimas [43]. O projeto prevê a instalação de SMRs, dois (ou mais) reatores¹⁶ de 30 megawatts em um grande navio mercante, capaz de transportar milhares de contêineres, conforme pode ser visualizado na Figura 22.

¹⁶ Os reatores seriam unidades pequenas e modulares. Pesquisadores consideram três tipos diferentes: um reator rápido resfriado com chumbo, um reator resfriado com gás hélio alimentado com urânio e um reator resfriado com sal fundido. O reator produziria vapor para girar turbinas que gerariam eletricidade para alimentar os motores [43].

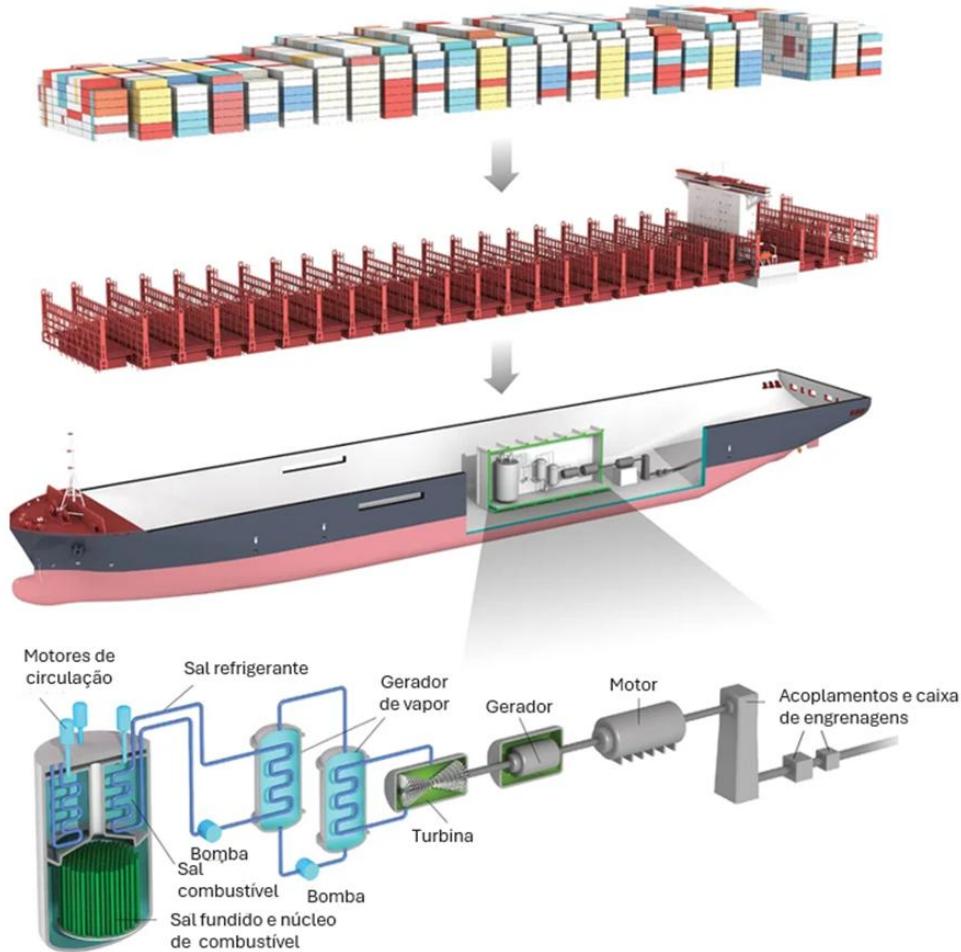


Figura 22 - Ilustração de um projeto de construção e instalação de SMR a bordo de navio [43]

A propulsão nuclear ainda enfrenta barreiras de implementação a superar, sendo as mais significativas, as questões de não-proliferação, prevenção de acidentes nucleares, necessidade de desenvolvimento regulatório internacional e uma melhor percepção da tecnologia por parte da sociedade [17].

6. Combustíveis Marítimos Alternativos

6.1. Contexto Atual

Considerando as metas estabelecidas pela IMO, o transporte marítimo busca substituir os combustíveis fósseis por alternativas que emitam menor quantidade de GEE em todo o seu ciclo de vida. Não se trata de tarefa simples uma vez que, em termos de números de navios, 98% da frota mundial atual utiliza combustíveis convencionais conforme Figura 23. Somente 2% usa combustíveis alternativos, com destaque para o Gás Natural Liquefeito - GNL (1.239), Bateria/Híbrido (940), Gás Liquefeito de Petróleo - GLP (139), Metanol (35), Hidrogênio (3) e Amônia (1) [3] [17].

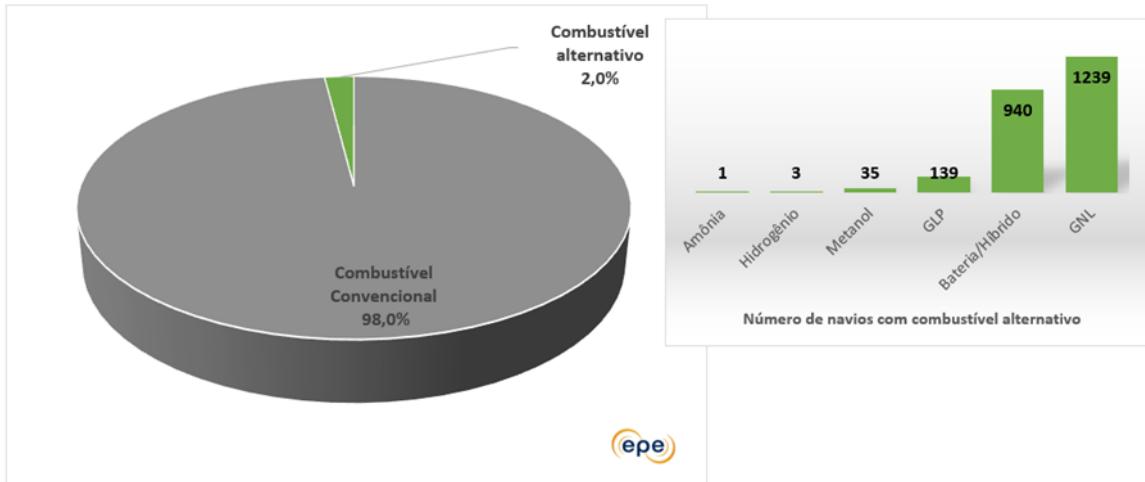


Figura 23 - Consumo de combustível alternativo na frota mundial de navios, em número de navios, em junho 2024 [17]

De acordo com a DNV [17], dos 1.239 navios em operação que utilizam GNL como combustível, 687 são navios transportadores de GNL e outros 552 transportam outros tipos de cargas. Da mesma forma, os 139 navios movidos a GLP referem-se a embarcações que transportam este mesmo combustível.

No que diz respeito a arqueação bruta (AB)¹⁷, 92,6% dos navios em operação, utilizam combustíveis convencionais, enquanto, 7,4% utilizam combustíveis alternativos de acordo com a Figura 24 [3] [17].

¹⁷ A arqueação bruta - AB (Gross Tonnage, em inglês) é um valor adimensional relacionado com o volume interno total de uma embarcação. A AB é calculada com base no volume moldado de todos os espaços fechados do navio e é usada para determinar, por exemplo, normas e regulação governamental, manobra e segurança da embarcação, bem como as taxas e tarifas portuárias [101].

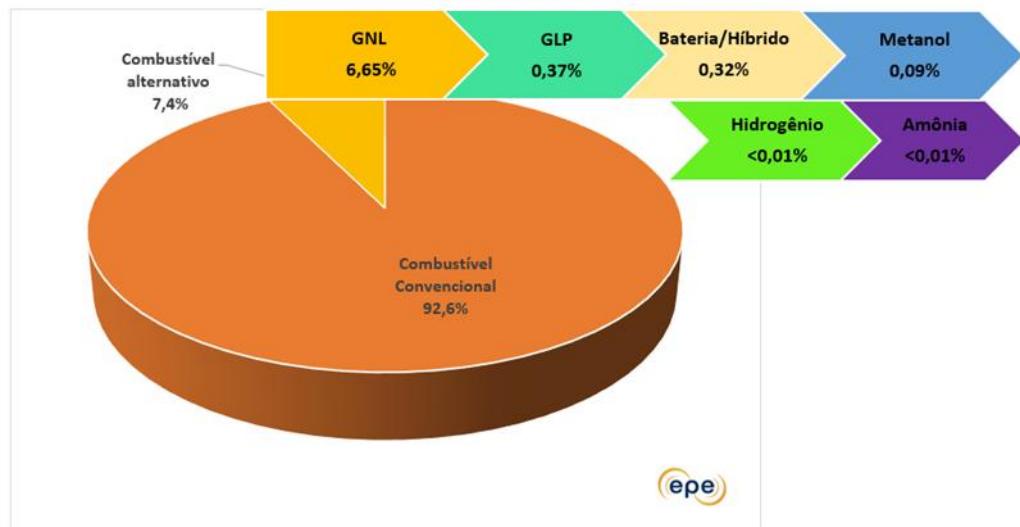


Figura 24 - Consumo de combustível alternativo, na frota mundial de navios, segundo arqueação bruta (AB), em junho 2024 [17]

Em termos de “número de navios”, GNL e bateria/híbrido são tecnologias/combustíveis predominantes, entretanto, em “arqueação bruta”, navios a GNL são a maioria (6,65%), sendo as opções por navios movidos a bateria/híbrido, aplicados principalmente a embarcações menores. Ressalta-se que os navios movidos a bateria quase sempre têm grupos geradores movidos a óleo combustível como reserva [17]

O cenário atual mostra que a transição para o uso de combustíveis de baixa emissão está progredindo, com a tendência de encomendas de grandes embarcações bicombustível (dual fuel) de acordo com a Figura 25.

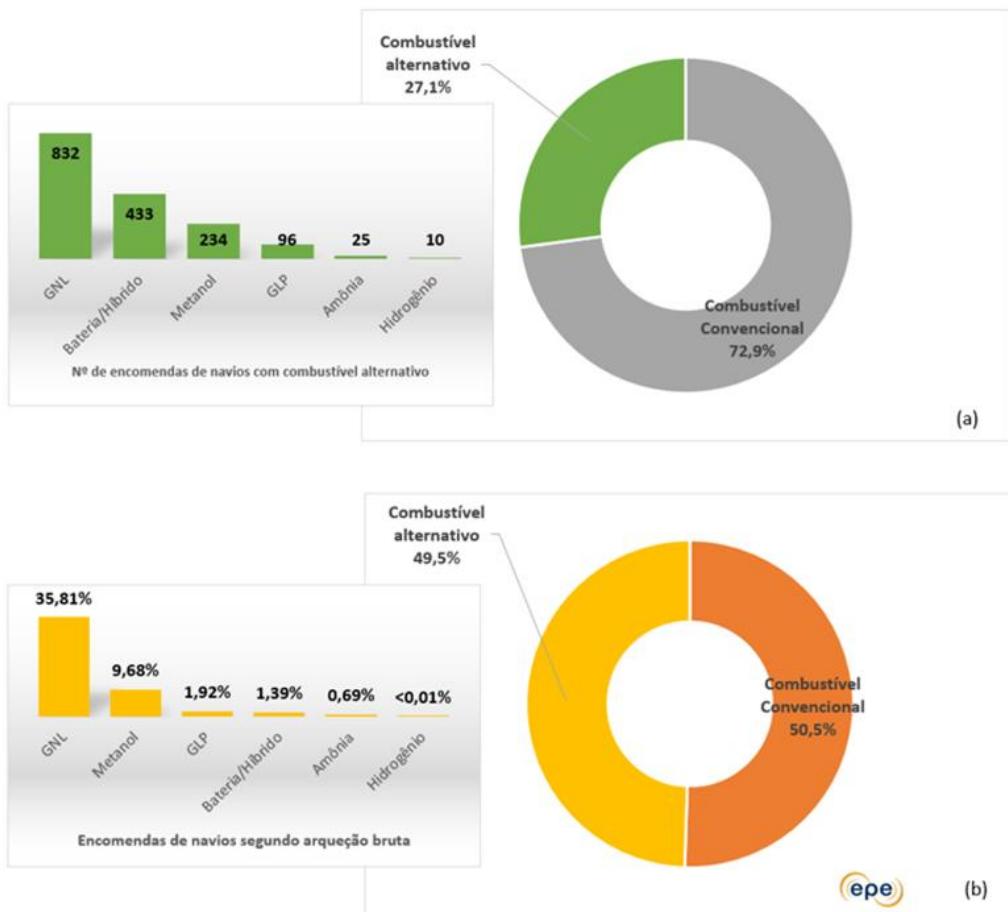


Figura 25 - Encomendas de novos navios a combustível alternativo, em junho 2024) [17]

(a) por nº de navios; (b) por arqueação bruta (AB)

As encomendas de novos navios a combustível alternativo, representam 27,1% do total, no que diz respeito a quantidade (1.630 encomendas) e 49,5%, em relação à arqueação bruta. O GNL tem sido a escolha principal de tecnologia (832 embarcações). No entanto, a carteira de encomendas também aponta para maior quantidade de embarcações movidas a bateria/híbridas (433), a metanol (234) e a GLP (96) e pequeno número com uso de amônia (25) e hidrogênio (10) como combustível. No que tange à Arqueação Bruta, observa-se um aumento na utilização do metanol, representando 9,68% das encomendas, com os navios porta contêineres representados em 173 encomendas, seguido por navios graneleiros (24) e transportadores de automóveis (20). Da mesma forma, o interesse pela amônia pode ser observado pelas 25 encomendas de embarcações, com destaque para navios graneleiros, transportadores de amônia e gás [17].

Neste contexto, a maioria dos navios que podem utilizar combustíveis alternativos também podem operar com óleos combustíveis em soluções de duplo combustível (dual fuel), cabendo considerar as emissões de GEE, segundo a abordagem well-to-wake [17] [21].

Maiores informações sobre as recentes encomendas de embarcações no contexto de redução de emissões podem ser acessadas no Apêndice B.

Todas as opções de combustíveis alternativos são acompanhadas de oportunidades e desafios, cuja viabilidade passa por uma análise minuciosa de diversos fatores, conforme pode ser visto na Figura 26.

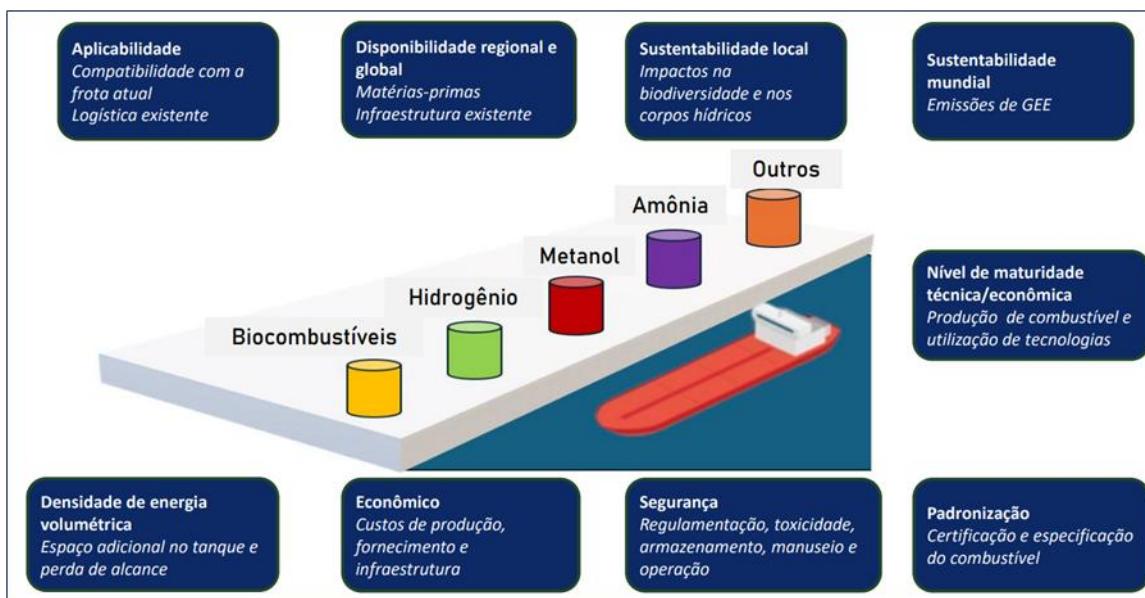


Figura 26 - Aspectos relevantes para viabilização dos combustíveis alternativos no transporte marítimo

A densidade energética volumétrica é uma grandeza que expressa a quantidade de energia que pode ser armazenada por unidade de volume de um combustível. Representa um parâmetro crítico com implicações diretas sobre a autonomia das embarcações, a infraestrutura de armazenamento e a viabilidade operacional de novas tecnologias no transporte marítimo. Desta forma, quanto maior a densidade energética volumétrica, menor será o volume necessário de combustível para gerar uma determinada quantidade de energia, o que é particularmente importante para o transporte marítimo, onde o espaço e o peso dos combustíveis são fatores limitantes. A Figura 27 expressa com clareza, a influência que a densidade energética e o poder calorífico exercem sobre peso e volume dos combustíveis.

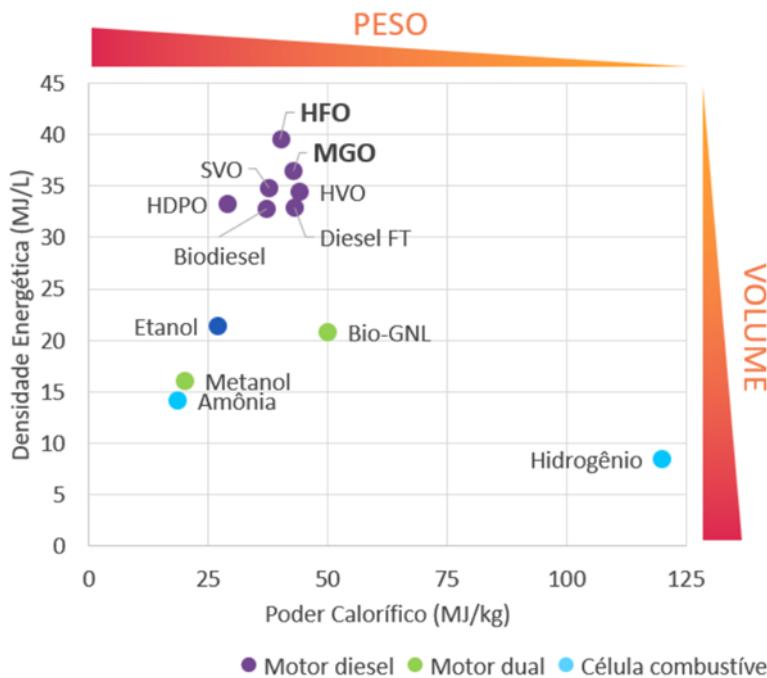


Figura 27 - Influência da densidade energética e poder calorífico sobre os combustíveis
[44]

Observa-se que metanol, amônia e hidrogênio apresentam densidade energética inferior comparativamente a estas propriedades para combustíveis convencionais, havendo a necessidade de adaptações nas embarcações e na infraestrutura logística no caso de usos desses combustíveis alternativos. Por sua vez, o biodiesel e o HVO, cuja densidade energética é similar aos combustíveis fósseis, podem ser utilizados como combustíveis marítimos, sem impor alterações significativas na infraestrutura existente e nos motores dos navios.

Ressalta-se que a existência de diferentes opções de combustíveis é importante, uma vez que não se prevê uma solução única em escala comercial para o transporte marítimo. Nas seções seguintes, serão apresentadas, em maiores detalhes, as características dos principais combustíveis alternativos com aplicação no transporte aquaviário.

6.2. Gás Natural Liquefeito - GNL

O GNL, é o gás natural liquefeito por resfriamento a -162°C. Quando comparado ao seu estado gasoso, ocupa 600 vezes menos espaço para armazenamento e transporte. Atualmente, o GNL é o combustível alternativo mais utilizado no transporte marítimo, em substituição ao bunker, podendo ser produzido em volumes significativos e cumprir os requisitos de SOx e NOx, para além de reduzir ao mesmo tempo as emissões de CO₂ (20–30%). Em particular, o GNL reduz significativamente a poluição por NOx e material particulado (MP) em comparação com os combustíveis convencionais, ao mesmo tempo que reduz as emissões de SOx em mais de 90%. No entanto, vazamentos de metano (não queimado) para o meio ambiente são observados (2-5%), variando em função dos tipos

de motor, o que aumenta o potencial de GEE. Desta maneira, o GNL apresenta-se como opção para a transição energética. Existem quatro tecnologias principais (motores/turbinas) que utilizam GNL como combustível, com diferentes características, eficiências e perfis de emissões, a saber: (i) ignição por centelha de queima pobre; (ii) bicompostível de baixa pressão – 4 a 2 tempos; (iii) bicompostível de alta pressão; (iv) turbina a gás [45].

6.3. Gás Liquefeito Petróleo- GLP

O GLP, é um gás obtido, nas refinarias de petróleo, principalmente nas unidades de destilação atmosférica, reforma catalítica e craqueamento catalítico, ou no processamento do gás natural, nas unidades de processamento de gás natural (UPGN's). É constituído principalmente por hidrocarbonetos de 3 a 4 átomos de carbono (parafínicos e olefínicos), apresentando-se no estado gasoso nas condições normais de temperatura e pressão, porém pode ser liquefeito por compressão [27].

Conforme DNV (2019), o GLP é uma fonte de energia tão atraente quanto o gás natural liquefeito (GNL) para ser utilizado como combustível marítimo, com uma infraestrutura considerável de GLP disponível em todo o mundo, incluindo instalações de armazenamento, terminais de exportação e refinarias costeiras com infraestrutura de carga e descarga. Em comparação com os combustíveis marítimos convencionais, o GLP pode reduzir as emissões de gases efeito de estufa como também o SOx e NOx, para além das emissões de material particulado. Quanto à questão de segurança de navios, a densidade do GLP é superior à do ar, o que significa que em caso de fuga dos vapores, eles acumular-se-ão na parte inferior do espaço envolvente, requerendo uma abordagem diferente para detecção de vazamentos e ventilação do que o GNL. Ademais, o GLP poderia atuar como um “combustível de ponte” para a amônia, uma vez que as instalações de GLP em um navio também podem ser adequadas para amônia [46].

6.4. Metanol

O Metanol (CH_3OH), também conhecido como álcool metílico, é produzido principalmente a partir do gás natural. Todavia, pode ser produzido de forma a diminuir as emissões de GEE a partir de recursos energéticos renováveis, sendo chamado de biometanol, se oriundo da biomassa, ou e-metanol, se obtido a partir do hidrogênio eletrolítico e CO₂ de origem biogênica ou captura direta. O metanol é abundante, disponível globalmente, facilmente miscível em água, biodegradável e pode ser 100% renovável, com potencial de redução de emissões de CO₂ (aproximadamente 25% em comparação com o bunker), de SOx (99%), de NOx (60%) e de MP (95%). O metanol é tóxico e apresenta densidade volumétrica, densidade energética e poder calorífico inferior aos combustíveis convencionais e requer cerca de duas vezes o volume de armazenamento dos combustíveis convencionais. Mesmo não sendo um combustível

drop-in nos motores a diesel, o metanol é compatível com a maioria dos motores marítimos e pode ser usado em motores bicompostível¹⁸ [47].

6.5. Hidrogênio

Atualmente, o hidrogênio (H_2) é produzido, majoritariamente, a partir de combustíveis fósseis, especialmente do gás natural. Todavia, o hidrogênio de baixo carbono pode ser produzido a partir de fontes renováveis, como biomassa, solar e eólica, através de diferentes processos como eletrólise, gaseificação e reforma. Pode ser usado como combustível em células de combustível ou como uma mistura com combustíveis marítimos convencionais¹⁹. Durante a combustão, o H_2 tem a vantagem de não liberar CO_2 , material particulado (MP) e SOx . No entanto, o hidrogênio, por sua baixa densidade volumétrica de energia, exige para seu uso a existência de infraestrutura adicional significativa, em especial para o armazenamento e abastecimento das embarcações. Diversas tecnologias para armazenamento de hidrogênio estão sendo avaliadas como: hidrogênio comprimido, hidrogênio liquefeito, armazenamento em produtos químicos (amônia, CO_2 e portadores de H_2 líquidos - LOHCs) e hidretos metálicos [45].

6.6. Amônia

A amônia (NH_3) é produzida comercialmente através do processo Haber-Bosch, a partir de nitrogênio e hidrogênio. A amônia também pode ser produzida empregando fontes de energia renováveis, como solar, eólica ou hidrelétrica, representando uma vantagem comparativa em relação ao bunker. No entanto, a produção de amônia de baixa emissão ainda não é competitiva em termos de custos em comparação com a amônia convencional. Semelhante ao hidrogênio, a amônia pode ser usada como combustível marítimo em motores diesel, turbinas a gás e como combustível primário em células de combustível. É tóxica e corrosiva, além de apresentar emissões consideráveis de NOx , o que exige adoção de equipamentos de pós-tratamento. A amônia, em comparação ao hidrogênio, permite mais estocagem de hidrogênio na forma líquida sem a necessidade de uso de armazenamento criogênico (-33,4°C para amônia em comparação com -252,9°C para hidrogênio), tornando este combustível um transportador de hidrogênio adequado. O custo de capital necessário para armazenar o hidrogênio é muito mais caro em comparação à amônia, apesar da densidade energética de ambos os combustíveis ser semelhante [45].

¹⁸ Entretanto, o metanol, tal como o GNL, apresenta baixo número de cetano (que é uma medida da qualidade de ignição), por isso a necessidade que seja utilizado um combustível piloto (diesel), em motor bicompostível, para se ter a ignição [47].

¹⁹ A queima de hidrogênio como combustível drop-in, em motores diesel marítimos é possível em baixos níveis de mistura, sem riscos significativos de danos ao motor [45].

6.7. Eletrocombustíveis (em inglês, e-fuels)

Combustíveis sintéticos produzidos a partir da combinação do hidrogênio, obtido através da eletrólise da água, com CO₂, podendo ser capturado da atmosfera ou de origem biogênica (de biomassa), oriundo, por exemplo, da etapa de fermentação no processo de produção de etanol, dos resíduos da produção de celulose, capturado da purificação do biogás, entre outros processos [48]. Nessa categoria, pode-se destacar para uso no setor marítimo: o e-diesel, o e-GNL e o e-metanol. Todos eles possuem características físico-químicas e desempenho similares aos seus análogos obtidos de rotas convencionais, porém carregam desafios em relação aos custos de produção [49].

6.8. Biocombustíveis

Como citado anteriormente, os biocombustíveis apresentam-se como uma alternativa relevante para o transporte marítimo, como meio de reduzir as emissões dos gases de efeito estufa. Esta é uma solução de descarbonização atrativa para os armadores, que pode reduzir a necessidade de investimentos de capital em grande escala que são necessários para outras opções de descarbonização, tais como a adaptação de motores dual fuel (duplo combustível) [17].

Os biocombustíveis podem ser produzidos em diversas partes do mundo e não apresentam complicações significativas para o abastecimento. As fontes de biomassa provenientes de produtos agrícolas principais são geralmente referidas como convencionais, enquanto as provenientes de fontes não alimentares são denominadas avançadas [17]. Os biocombustíveis são obtidos por diversas rotas, pela conversão de matéria orgânica (biomassa) em um produto combustível. Embora o CO₂ seja emitido durante a combustão da maioria dos biocombustíveis, isto é compensado pelo fato da biomassa absorver CO₂ da atmosfera, indicando o potencial de neutralidade em carbono destes combustíveis.

Neste sentido, de acordo com a Bureau Veritas [50], os biocombustíveis ou as suas misturas seriam ambas alternativas²⁰ com menor intensidade de carbono aos combustíveis fósseis, numa perspectiva well-to-wake. Ainda assim, os biocombustíveis são objeto de um exame mais minucioso nas suas rotas de produção e na possibilidade

²⁰ Em 2022, foram utilizados um total de 930 mil toneladas de misturas de combustível marítimos com biocombustíveis, nos portos de Singapura e Roterdã. Considerando um percentual médio de 30% de bicombustível na mistura, tem-se um valor de aproximadamente 280 mil toneladas de biocombustível puro, o que representa 0,1% da demanda mundial de combustível marítimo (280 Mt/ano) [109]. De acordo com a MPA (Maritime and Port Authority of Singapore), as vendas de bunker com misturas de biocombustíveis aumentaram para 520.000 toneladas, o que é mais do que o triplo, de 140.000 toneladas comercializadas em 2022. Misturas de biocombustíveis até B30 estão comercialmente disponíveis, enquanto testes de até B100 estão em andamento [57].

de concorrência por parte de outros setores de transporte, cabendo destacar três aspectos, que merecem atenção quanto à sua produção destes:

- i. deve-se garantir que a produção seja feita de forma sustentável – necessidade de um padrão global para verificar rotas de produção de baixa emissão de ponta a ponta para biocombustíveis;
- ii. a alocação de recursos (a terra utilizada para a produção de biomassa, ou mesmo a própria biomassa) deve ocorrer de forma ética;
- iii. garantia de disponibilidade.

As opções de biocombustíveis para o transporte marítimo são:

- a) Biodiesel (da sigla FAME, Fatty Acid Methyl Esther - éster metílico de ácido graxo): é produzido por transesterificação a partir de óleos vegetais, gorduras animais ou óleos de cozinha usados, em que os triglicerídeos contidos nesses insumos são convertidos em ésteres metílicos, gerando glicerol como coproduto. Este é o tipo de biodiesel²¹ mais amplamente disponível na indústria e, recentemente, tem sido aplicado tanto em sua forma pura (B100)²² em navegações fluviais quanto em misturas com combustível marítimo, como o B24 comercializado pela Petrobras [51, 52]. Atualmente, FAME é o biocombustível mais utilizado em aplicações marítimas²³ [17]. Dentre as vantagens de seu uso podem ser destacadas a densidade energética próxima a dos combustíveis já utilizados nos motores e a maturidade dos processos de produção e distribuição. Mesmo podendo ser utilizado com pouca ou nenhuma alteração no motor, a preocupação com seu uso envolve a estabilidade e a possibilidade de contaminação com água [49].
- b) Diesel Verde: é o óleo diesel de origem renovável que apresenta composição química similar ao fóssil, sendo assim um produto drop-in, isto é, que pode ser introduzido diretamente em instalações de distribuição e reabastecimento, bem como em motores diesel existentes, sem qualquer modificação adicional²⁴. Pode ser produzido por diversas rotas, sendo a de maior proeminência aquela a partir do óleo vegetal hidrogenado (HVO, na sigla em inglês), que converte gorduras ou óleos vegetais – sozinhos ou misturados com petróleo – através de um processo conhecido como hidrotratamento de ácidos graxos em hidrocarbonetos. A sua alta densidade energética,

²¹ A norma europeia que especifica o biodiesel (FAME) é a EN 14214.

²² A ASTM especifica o B100 por meio da norma ASTM D6751.

²³ O biodiesel FAME para uso como combustível para transporte marítimo ou terrestre, respectivamente, é normatizado pelas seguintes normas internacionais: ISO 8217:2024 e EN 590.

²⁴ Pode -se citar como uma das normas internacionais que especifica o óleo diesel, independente de origem fóssil ou de biomassa, a ASTM D 975.

propriedades e crescente produção em escala comercial torna o “diesel verde” atrativo para substituição de combustíveis fósseis em setores de difícil abatimento de emissões, como o marítimo e o aerooviário, sendo este último um potencial competidor pelo uso das matérias-primas para obtenção de SAF (Sustainable Aviation Fuel) através da rota HEFA²⁵, mesma utilizada para obtenção de HVO [49]. Uma desvantagem estaria está relacionada ao preço.

c) Etanol: é um biocombustível obtido de fontes renováveis, como cana-de-açúcar, milho e beterraba, através de processos de fermentação e destilação. Composto principalmente de álcool etílico, pode ser usado em motores convencionais com gasolina (em misturas específicas) e em veículos *flex fuel*²⁶, sem necessidade de adaptações. Além do uso no transporte rodoviário, o etanol também vem sendo explorado como combustível marítimo. Existem dois tipos principais de etanol: o de primeira geração, feito de matérias-primas ricas em açúcar e amido, e o de segunda geração, a partir de biomassa lignocelulósica, como resíduos agrícolas, o que eleva sua sustentabilidade. Devido à sua menor densidade energética frente ao diesel verde e biodiesel, há necessidade de um maior espaço de estocagem nas embarcações. Embora sejam necessários cuidados com a segurança em função da corrosividade do etanol para alguns materiais, trata-se de um combustível biodegradável, com cadeia de suprimentos consolidada e alta disponibilidade em algumas partes do mundo. Além disso, há potencial de ser usado em motores diesel²⁷, com vistas ao aprimoramento do número de cetano e de seu poder lubrificante [49, 53].

O etanol também pode ser usado como matéria-prima para a produção de outros combustíveis de interesse, como o hidrogênio de baixo carbono – através de reações de reforma do etanol – e o diesel verde e SAF, através de rotas conhecidas como ATJ (do inglês, alcohol-to-jet).

d) Biometano: biocombustível gasoso derivado da purificação do biogás e constituído essencialmente de metano (CH_4). O biogás pode ser obtido pela decomposição anaeróbia de diversas matérias orgânicas de resíduos como os urbanos e agropecuários, tendo vinhaça, torta de filtro e palha e pontas geradas pelas usinas de cana-de-açúcar como exemplos [54]. Sua aplicação como combustível marítimo não é possível em motores a ciclo diesel, somente em motores dual *fuel*. Porém, como já existem navios que utilizam GNL, a infraestrutura para emprego do biometano como bio-GNL está disponível e os benefícios de redução significativa de SOx e NOx se mantêm [53]. Os desafios estão relacionados ao espaço de armazenamento requerido, que

²⁵ Hydroprocessed Esters and Fatty Acids. Consiste no hidroprocessamento de ésteres e ácidos graxos para a produção de biocombustíveis, principalmente diesel verde e SAF.

²⁶ O uso automotivo é normatizado pela ASTM D4806.

²⁷ A Compagnie Maritime Monégasque (CMM) e a Wartsila anunciaram a construção de barcos de apoio marítimo (PSVs) movidos a etanol. Testes em escala real já foram realizados nos motores multicombustíveis da Wartsila [110].

precisam ser maiores do que os usados para os combustíveis destilados devido à menor densidade energética do biometano [49].

- e) Biometanol: é a mesma molécula do metanol, com diferenças na forma de obtenção. É obtido a partir de biomassa, incluindo resíduos florestais, agrícolas e urbanos. Pode ser produzido por meio da gaseificação desses resíduos ou mesmo a partir do processo de reforma a vapor do biogás/biometano. Há infraestrutura em vários portos, que movimentam o metanol fóssil, para a sua aplicação. Assim como em outros biocombustíveis, a densidade energética e o maior espaço de armazenamento constituem desafios de aplicação desse combustível.
- f) FT-diesel: combustível sintético produzido a partir de biomassa por meio de conversão termoquímica seguida de processo Fischer-Tropsch (FT). O óleo diesel obtido pelo processo FT é um combustível drop-in e com alta densidade energética, equiparável ao do diesel marítimo de origem fóssil, seguindo as mesmas normas vigentes para sua versão fóssil. Os desafios de aplicação desse biocombustível estão no custo e no aumento de escala. Há testes realizados em escala piloto e de demonstração comercial [55, 49]. Uma mesma instalação industrial pode produzir outros combustíveis de interesse e alto valor, como o SAF. Neste contexto, existe uma tendência de direcionamento da produção industrial para maior produção deste combustível, uma vez que o SAF destinado para setor aeroviário pode ser comercializado em patamares de preço superior ao do óleo diesel, o que contribui para maior viabilidade desses projetos, que possuem maiores custos de implementação. [49].

6.9. Desafios aos Combustíveis Alternativos

Há de se destacar que, uma mudança tecnológica impulsionada pela transição para combustíveis neutros em carbono terá de coincidir com um desenvolvimento correspondente, do conhecimento específico dos combustíveis em termos de competência dos operadores marítimos e das organizações terrestres, e na indústria marítima em geral. Em comparação com os combustíveis convencionais, os riscos de segurança decorrentes das propriedades dos combustíveis alternativos – a natureza gasosa do hidrogênio, da amônia e do metano; a toxicidade da amônia e do metanol; os riscos de baixas temperaturas associadas ao metano, hidrogênio e amônia; a inflamabilidade do metanol, metano e hidrogênio trazem uma nova complexidade às operações de abastecimento, armazenamento de combustível a bordo, distribuição e manutenção de combustível. A maior parte dos projetos de combustíveis alternativos derivados de hidrogênio se encontram em estágio inicial, incluindo o baixo grau de maturidade de algumas tecnologias de produção de biocombustíveis, como o BTL.

Por outro lado, os biocombustíveis como biodiesel, diesel verde, etanol, biometanol e biometano apresentam maior maturidade tecnológica e mais disponíveis para o abastecimento de embarcações [17]. A Figura 28 apresenta uma comparação entre os combustíveis marítimos convencionais e biocombustíveis.

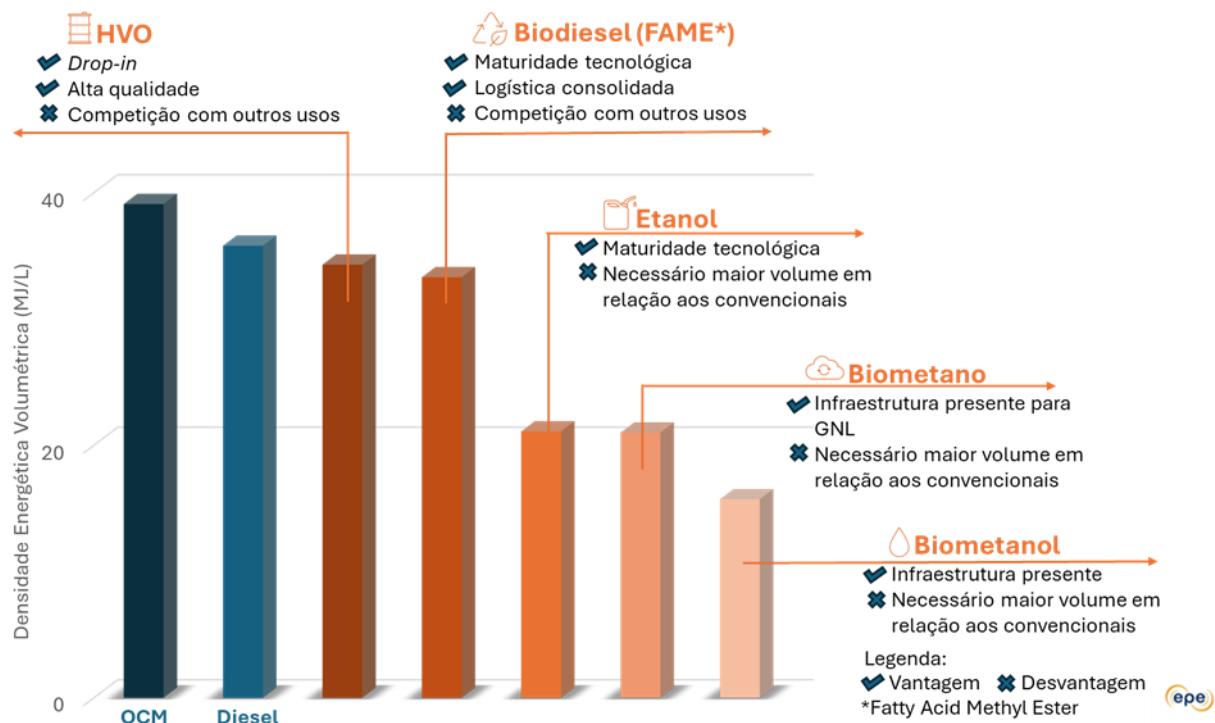


Figura 28 - Densidade energética, vantagens e desvantagens entre os principais combustíveis convencionais e os biocombustíveis para uso no transporte marítimo [49] e [56]

A despeito dos desafios e das novas exigências, que deverão ser estabelecidas em um futuro rumo à transição energética e à descarbonização, assim como práticas para garantir operações contínuas, seguras e eficientes, o setor marítimo tem apresentado algumas ações.

No que tange ao GNL, destaca-se o incremento nas vendas de GNL, que ascendeu a 110.000 toneladas em 2023, contra 16.000 toneladas, em 2022. Ademais, em julho de 2023, o Porto de Singapura (Maritime & Port Authority of Singapore - MPA) conduziu a primeira operação de abastecimento de metanol de navio contêiner do mundo, onde cerca de 300 toneladas de metanol verde foram fornecidas pela primeira vez neste porto. Em relação à eletrificação, em 2023, para apoio de todo o ecossistema marítimo em águas portuárias, novas balsas de passageiros e navios de abastecimento totalmente elétricos (para 200 pessoas) foram implantadas em 2023 [57].

Em relação aos biocombustíveis, muitos dos principais fornecedores de combustíveis marítimos tem se preparado para atender a demanda de biocombustíveis para esse setor. Algumas dessas iniciativas são apresentadas na Figura 29.

Integr8 Fuels receives ISCC certification for biofuel trading

By The Editorial Team — December 18, 2023 in Fuels



Integr8 Fuels has announced they have been awarded certification from the International Sustainability and Carbon Certification (ISCC) scheme for the trading of biofuels.

TFG Marine Announces Biofuel Stem With Carbon Offsets

By Ship & Bunker News Team

Monday, February 7, 2022

Marine fuel supplier **TFG Marine** has carried out a biofuel bunker delivery to a **Western Bulk Chartering** vessel with the emissions from the fuel covered by carbon offsets.

TFG recently delivered a **B50** blend with **50%** biofuel content to the bunker barge **Bees Cyclo** at **Rotterdam**. It said in an emailed statement on Monday:

Full lifecycle emissions from the production, supply and consumption of the fuel were covered by carbon offsets.

[In Share](#) Tweet Follow @shipandbunker



The bunker operation was carried out at Rotterdam. Image Credit: TFG Marine

World Fuel Services Unit Supplies Biofuel Blend in Gibraltar

By Ship & Bunker News Team

Wednesday, December 14, 2022

A unit of global marine fuel supplier **World Fuel Services** has carried out a biofuel blend delivery in **Gibraltar**.

WFS subsidiary **Gib Oil** bunkered Norwegian Cruise Line Holdings's ship the **Seven Seas Splendor** with a renewable diesel blend at Gibraltar on **October 14**, the company said in a [LinkedIn](#) post on Tuesday.

[In Share](#) Tweet Follow @shipandbunker



The supply operation was carried out in collaboration with biofuels firm **GoodFuels**. Image Credit: World Fuel Services

Glomar claims 28% emissions reduction using GoodFuels' biofuel

February 25, 2024, by [Katrina Barritt](#)

Dutch offshore drilling services provider **Glomar Offshore** has revealed that it has achieved CO2 emissions reduction by 28% by transitioning from traditional fuels to **GoodFuels' HVO30**, a sustainable marine biofuel blend.



Vitol Introduces Dedicated Biofuel Bunker Barge in Singapore to Meet Demand



Figura 29 - Anúncios de uso de biocombustíveis em misturas com bunker por parte de algumas empresas de comércio de combustível marítimo.

No Brasil, também se observam iniciativas²⁸ de inclusão de biocombustíveis nas misturas com bunker para uso nos navios.

Em dezembro de 2023, a Petrobras iniciou testes com misturas de bunker com 24% de biodiesel de matéria-prima residual (sebo) (Figura 30). O B24 foi utilizado no Terminal de Rio Grande (RS), para abastecimento de navio usado em rotas de cabotagem de contêineres no litoral brasileiro. O biodiesel adquirido para compor a mistura seguiu os critérios da Diretiva para Energias Renováveis da União Europeia (EU RED) e da certificadora International Sustainability & Carbon Certification (ISCC), uma das mais tradicionais certificações existentes no mercado, aplicável para rastreabilidade e cálculo das emissões de GEE de matérias-primas e bioproductos mais sustentáveis [58].

Em julho de 2024, a Petrobras, recebeu autorização da ANP, para comercializar óleo combustível marítimo (bunker) com 24% de biodiesel (B24) [59]. Ainda neste mesmo mês, a Petrobrás realizou sua primeira comercialização de combustível marítimo com conteúdo renovável, o VLS (Very Low Sulfur) B24, produzido a partir de resíduos agroindustriais. O produto foi misturado no Terminal de Rio Grande (RS) da Transpetro.

²⁸ No início de 2024, a Bunker One, empresa multinacional de comercialização de combustíveis marítimos, em parceria com a UFRN, anunciaram a finalização de um estudo de mistura B7 com diesel marítimo. O biodiesel é constituído por 50% de resíduos animais, como sebo suíno ou gordura de porco, e os outros 50% com óleo de cozinha usado [102].

O abastecimento de navios com esse tipo de bunker acontece da mesma forma que o bunker mineral, podendo ocorrer por meio de operações de barcaças ou atracados [60].

Em novembro de 2023, a Vale, em parceria com a Oldendorff Carriers, iniciou sua primeira viagem com biocombustível (B24) em um navio minereiro Newcastlemax (Figura 30). A mistura B24 é composta por óleo combustível e por biodiesel produzido a partir de resíduo de óleo vegetal de cozinha (286 toneladas). O produto fornecido está em conformidade com a EU RED e é certificado pela ISCC. A economia esperada de carbono equivalente (CO_2eq) no ciclo de vida do combustível (well to wake) é de cerca de 18%, ou cerca de 785 toneladas de CO_2eq . O uso de biocombustível faz parte do programa Ecoshipping, uma iniciativa de P&D desenvolvida pela área de navegação da Vale para reduzir as emissões de gases de efeito estufa do transporte marítimo, em linha com as ambições estabelecidas pela Organização Marítima Internacional (IMO) [61].



(a) Teste Petrobras (b) Teste Vale

Figura 30 - Anúncios de abastecimento de navios com mistura bunker + B24 [58] [61]

No primeiro semestre de 2024, a Organização Internacional de Normalização (International Organization for Standardization – ISO), apresentou a Norma revisada ISO 8217/24, que define as classificações e os tipos de combustíveis marítimos, bem como os requisitos de qualidade/especificações. A revisão da Norma incorpora mudanças importantes, principalmente devido à crescente utilização de misturas de biocombustíveis ao combustível marítimo convencional, em resposta à descarbonização do transporte marítimo. Entre as principais mudanças destacam-se:

- Inclusão de requisitos de especificação para as ECAs²⁹ (Áreas de Controle de Emissões) e áreas globais;
- Inclusão de especificações para embarcações que utilizam *scrubbers*³⁰;
- Inclusão de requisitos de inserção de misturas BX (FAME) no bunker e óleo diesel marítimo, até 100% v/v;
- Inclusão de requisitos de inserção de uso de diesel parafínico (HVO - Hydrotreated Vegetable Oil) até 100% v/v.

7. Outras Iniciativas de Descarbonização do Transporte Marítimo

7.1. Corredores Marítimos Verdes

Iniciativas como o estabelecimento de “Corredores verdes” podem contribuir para o desenvolvimento das tecnologias de combustíveis alternativos (de menor emissão). São reconhecidos como um mecanismo fundamental para acelerar a descarbonização a partir de 2030 [62] por meio de seu uso e expansão de sua infraestrutura de abastecimento [18].

Os corredores verdes podem ser definidos como rotas marítimas específicas (entre dois ou mais portos), onde a viabilidade tecnológica, econômica e regulamentar do transporte marítimo com emissões zero é catalisada por uma combinação de ações públicas e privadas, entre elas [17] [62]:

- o aumento da produção de combustíveis;
- o desenvolvimento de infraestruturas;
- o incremento da maturidade tecnológica;
- o estabelecimento mais célere de normas e regulamentos de segurança;
- o desenvolvimento de novas políticas de apoio;

²⁹ Em inglês, *Emission Control Area – ECA*. São designadas para diminuir às emissões das embarcações, em áreas costeiras e cidades portuárias, exigindo controles mais rigorosos sobre combustíveis e motores. Desde 2015, o teor de enxofre dos combustíveis marítimos nas ECAs é de 0,10%. Para regiões fora das ECAs (áreas globais), a IMO estabeleceu em 2020, o valor máximo de 0,50%. Ressalta-se que é autorizado o uso de combustíveis com percentuais superiores, fora das ECAs, desde que a embarcação seja equipada com *scrubbers* [103].

³⁰ Também conhecidos como “lavadores de gases de exaustão”, são equipamentos instalados nos sistemas de escape dos navios (que utilizam combustíveis com teor de enxofre acima do especificado) para reduzir as emissões de enxofre e outros poluentes, em atendimento às regulamentações de controle de emissões da IMO [103].

- a promoção do mercado por serviços de transporte marítimo verdes e contratos verdes.

Embora a jornada de cada corredor provavelmente seja diferente e dependa de diversos fatores, as principais fases de desenvolvimento e o início da operação podem ser resumidas na Figura 31.

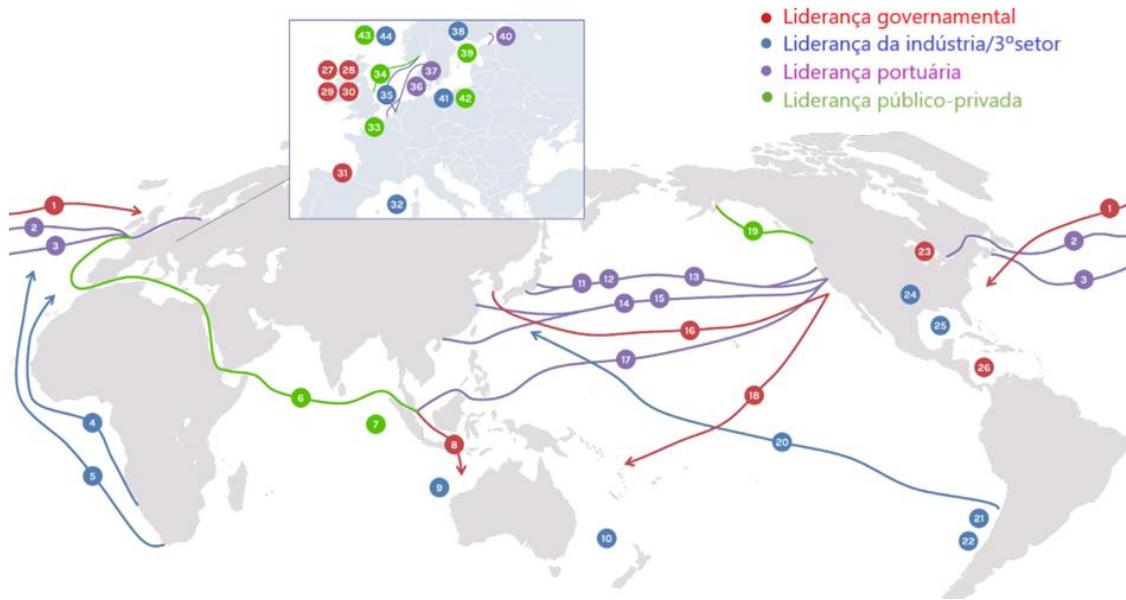


Figura 31 - Principais fases para a implementação de corredores marítimos verdes [62]

Um conceito de corredor marítimo verde envolve um ecossistema de muitos intervenientes, tais como proprietários e afretadores de carga, portos, armadores e operadores, fornecedores de energia, instituições financeiras, autoridades e outros agentes envolvidos na atividade do setor marítimo.

Vários planos para desenvolver tais corredores foram anunciados, envolvendo diversos tipos de embarcações, tipos de combustível e tecnologias. Entre as ações destaca-se a Declaração de Clydebank³¹, na qual mais de 20 países se comprometeram em desenvolver pelo menos seis corredores marítimos verdes até 2025, e muitos mais até 2030 [17]. Desde então, os anúncios de corredores verdes chegaram a 44 em 2023 (ano em que a IMO adotou sua estratégia revisada de GEE) e alcançaram 57 iniciativas em fevereiro 2024 [63]. Uma visão geral dos 44 corredores de navegação verdes (todos em fase inicial de planejamento) anunciados em 2023, pode ser visto na Figura 32. Em termos geográficos, mais de metade das iniciativas abrangem rotas marítimas de curta distância, com destaque para as do Mar Báltico e Mar do Norte (18), que representam o maior *cluster* geográfico, seguidas pelos corredores nas regiões Transpacífico (10), América do Norte (6) Ásia-Pacífico (5), Pacífico Sul (3) e Atlântico Sul (2) [62], de acordo com Figura 32.

³¹ Instituída em novembro de 2021, na COP 26, na cidade de Glasgow, Escócia. É um conjunto de intenções para promover a criação de corredores marítimos verdes através da cooperação entre países e os diferentes atores do setor, cujo objetivo principal é reduzir o impacto ambiental das atividades marítimas em todo o mundo. A Declaração de Clydebank reconhece ainda que, nem todos os navios que naveguem entre portos, num corredor marítimo verde seriam obrigados a ser neutros em carbono ou a participar nas parcerias do corredor [17].



1-Força-tarefa EUA-Reino Unido	16-República da Coréia-EUA	31- Espanha (Corredores verdes)
2-Antuérpia-Montreal	17-LA-Long Beach-Singapura	32- La Méridionale (O Sul)
3-Halifax-Hamburgo	18-EUA-Fiji-Pacífico	33-Barca Dover-Calais/Dunkirk
4-Namíbia-UE	19-Pacífico Noroeste-Alasca	34- Travessia do Mar do Norte (H2)
5-África do Sul-Europa minério ferro	20-Chile (Cobre)	35-Oslo-Roterdã
6-Roterdã-Singapura	21-Chile (Piscocultura)	36-Gotemburgo-Roterdã
7-Aliança da seda	22-Chile (ácido sulfúrico)	37-Gotemburgo-Porto Mar Norte
8-Singapura-Austrália	23-Canadá-EUA-St Lawrence	38-Alanda-RoPAX
9-Austrália-Norte Ásia minério ferro	24-EUA (granel verde)	39-Decatrip
10-Austrália-Nova Zelândia	25-Golfo do México	40-FIN-EST
11-Oakland-Yokohama	26-EUA-Panamá	41-Rede Europeia GC
12-LA-Nagoya	27-Reino Unido-Bélgica	42-Roteiro Nôrdico
13-LA-Yokohama	28-Reino Unido-Noruega	43-Clean Tyne
14-LA-Guangzhou	29-Reino Unido-Holanda	44-GREEN BOX
15-LA-Long Beach-Xangai	30-Reino Unido-Dinamarca	

Figura 32 - Iniciativas anunciadas de corredores marítimos verdes, em 2023 [62]

Até o fim de 2023, o transporte marítimo de contêineres e balsas representavam os dois maiores segmentos de transporte marítimo, com 11 e 8 iniciativas de corredores verdes, respectivamente, seguidos pelos segmentos de granéis sólidos (6), petroleiros (3) e cruzeiros (1). É relevante citar, que 19 iniciativas não declararam o segmento do transporte marítimo aplicado aos corredores verdes. No que diz respeito a opção pelo combustível de baixo carbono, metanol (14) e amônia (9) são os preferidos, acompanhados por hidrogênio (6), propulsão elétrica (4), biocombustíveis avançados (2), e outros (2) [62].

Os portos de Antuérpia-Bruges, Hamburgo, Roterdã e Singapura pretendem posicionar-se como centros de abastecimento multicombustível. A assinatura do Memorando de Entendimento (MOU) para o Corredor Verde Singapura – Roterdã em Singapura, em 2 de agosto de 2022, é uma sinalização da tendência de corredores verdes [64], em 19 novembro 2024, o Corredor verde Roterdã-Singapura realizou um piloto de abastecimento com biometano liquefeito (LBM, sigla em

inglês), em um navio porta-contêineres movido a GNL. O LBM foi produzido a partir de matérias-primas residuais, com certificado de prova de sustentabilidade e, em conformidade com os regulamentos da União Europeia [65].

Brasil e Portugal, representados respectivamente, pelo Complexo de Pecém e a Administração Portuária do Algarve e Sines (APS), assinaram no final de junho de 2024, um memorando³² de entendimento com o objetivo de fomentar a cooperação entre as duas instituições, especialmente no âmbito da sustentabilidade, de forma a estabelecer e desenvolver corredores logísticos sustentáveis e atrair investimentos estruturantes e de promoção da política industrial, em parceria com segmentos como do agronegócio, dos combustíveis sintéticos e do hidrogênio verde [66].

Para além das ações do próprio setor privado, os governos nacionais também têm papel importante, uma vez que podem contribuir seja na forma de incentivos, seja na forma de promoção de políticas e programas de financiamento para o setor privado, reduzindo o risco dos investimentos em tecnologias escalonáveis com emissão zero e a redução da disparidade de custos, associada ao desenvolvimento inicial da tecnologia. A natureza transfronteiriça e intersetorial dos corredores fortalece a colaboração entre agências governamentais e entre os governos, e adotem uma abordagem participativa, proativa e sistêmica para conceber e implementar políticas [67].

7.2. Frentes e Iniciativas Privadas

Além dos corredores verdes, segundo a IEA [68], alguns intervenientes da indústria em todo o setor do transporte marítimo (construtores navais, operadores, proprietários de carga etc.) uniram-se no âmbito de diferentes iniciativas que visam promover estratégias de descarbonização do transporte marítimo. O Quadro 3 reúne algumas das frentes e iniciativas.

Quadro 3 - Iniciativas privadas para descarbonização do transporte marítimo [68]; [69]; [70]; [71]

 CO-ZEV <small>CARGO OWNERS FOR ZERO EMISSION VESSELS</small>	<p>Iniciado pelo <i>Aspen Institute</i> em 2021, reúne diversas empresas internacionais, incluindo a <i>Amazon</i>, com o objetivo de utilizar apenas transporte marítimo de carga, com zero emissão de carbono, até 2040.</p>
 ZEMBA	<p><i>Zero Emission Maritime Buyers Alliance</i> foi instituída para acelerar a implantação comercial de transporte marítimo com emissão zero, permitir economias de escala e maximizar o potencial colaborativo de redução de emissões dos proprietários de carga, além do que qualquer comprador de frete poderia realizar</p>

³² O Memorando de Entendimento é firmado no âmbito da Global Gateway, uma estratégia europeia lançada em dezembro de 2021 para promover ligações inteligentes, limpas e seguras em nível dos setores digital, da energia e dos transportes, alinhada com a Agenda 2030 das Nações Unidas e com o Acordo de Paris [66].

	sozinho. ZEMBA é uma iniciativa dos Proprietários de Carga para Embarcações de Emissão Zero (coZEV).
	Lançada em 2019, é uma aliança com mais de 200 organizações nos setores marítimo, energético, de infraestruturas e financeiro. A Coligação está empenhada em colocar em funcionamento até 2030 navios comercialmente viáveis com emissões zero em águas profundas, alimentados por combustíveis com emissões zero, rumo à descarbonização total até 2050.
 POSEIDON PRINCIPLES	Onze bancos líderes mundiais, representando conjuntamente aproximadamente 100 bilhões de dólares em empréstimos (cerca de 80% do portfólio global de financiamento de navios), uniram-se em junho de 2019, para estabelecer os Princípios Poseidon, que fornecem estruturas para integrar considerações climáticas nas decisões de empréstimo para o transporte marítimo internacional e para alinhar as atividades de fretamento com os objetivos de descarbonização, respectivamente.

7.3. Eficiência Operacional

Como medidas de eficiência operacional, podem ser citadas a otimização do trim³³ e lastro³⁴ das embarcações marítimas, a limpeza regular de casco e hélice, melhorias na manutenção do motor, otimização do roteamento meteorológico, programação e utilização do navio e melhorias de design das embarcações. As medidas operacionais não exigem investimentos significativos em hardware ou equipamentos. No entanto, a implementação destas medidas irá exigir a operação de tecnologias, softwares e controles, que têm se tornando aspectos importantes na operação e projeto das embarcações, envolvendo também mudanças em gestão e treinamento [17]. As medidas de eficiência técnica geralmente visam reduzir a propulsão e demanda de energia do motor auxiliar (por exemplo, aumentando a eficiência do casco e da hélice, reduzindo a carga de energia quando o navio estiver no porto - energia em terra) ou melhorar a produção de energia (por exemplo, recuperação de calor residual, sistemas híbridos de bateria e otimização do sistema de máquinas). Muitas medidas técnicas têm sido aplicadas às novas embarcações, devido às dificuldades ou aos elevados custos de modernização de navios existentes [17].

7.4. Atuação dos Portos na Descarbonização do Transporte Marítimo

Os portos são espaços fundamentais para o comércio global e, portanto, considerados como catalisadores do desenvolvimento econômico dos países. Milhares de portos em todo o mundo lidam com o comércio marítimo. Da mesma

³³ O trim diz respeito à posição longitudinal da embarcação, ou seja, o quanto ela está inclinada para frente (próxima à proa) ou para trás (próximo à popa). Um trim apropriado é indicado para manter a estabilidade da embarcação e reduzir o consumo de combustível.

³⁴ O lastro é aplicado para dar estabilidade e flutuação à embarcação, especialmente quando ela não está totalmente carregada.

forma, os navios também são importantes para a economia mundial e para o comércio. Embora a indústria naval esteja atuando para cumprir os regulamentos internacionais de descarbonização, o papel dos portos também é fundamental nesta mudança de paradigma. A estratégia de GEE da IMO sinalizou aos países membros para se prepararem e facilitarem a redução de GEE no transporte marítimo. Além disso, a IMO adotou a Resolução MEPC.366 (79), em junho de 2022, que instava os portos a promoverem a cooperação voluntária com a indústria naval para reduzir as emissões de GEE dos navios [72]. Neste sentido, os portos podem facilitar a descarbonização do transporte marítimo através da adoção de medidas técnicas e operacionais na interface navio-porto, dentre as quais:

- i. fornecimento de energia em terra (OPS - Onshore Power Supply), preferencialmente a partir de fontes renováveis e sistema de carregamento de baterias de navios hiper alimentados para navios elétricos;
- ii. fornecimento de abastecimento com combustíveis alternativos, como GNL, amônia, metanol e hidrogênio;
- iii. facilitação da chegada virtual do transporte marítimo, atracação Just-In-Time (JIT) e redução da velocidade do navio (VSR- Vessel Speed Reduction) através da utilização de troca eletrônica de dados, PortCDM e outras tecnologias digitais;
- iv. redução do tempo de rotação dos navios (ocioso), por meio de alocação de berços, alocação e programação de pátios, sistema de automação e operação de terminais de contêineres (TOS - Terminal Automation and Operation System), sistemas automatizados de amarração (MAS - Automated Mooring Systems) e operações mid-stream;
- v. prestação de serviços diversos, como limpeza de casco e polimento de hélices e serviços elétricos de bombas em terra, para líquidos a granel.

Do outro lado do espectro, as autoridades portuárias, ao reconhecerem as externalidades ambientais nas suas operações e logística, podem implementar várias medidas e políticas para reduzir as emissões. O porto e as autoridades públicas (governo federal, estadual e municipal) podem utilizar ferramentas políticas e de gestão para reduzir as emissões de GEE do transporte marítimo, entre outros poluentes, na área portuária e fora dela [72]. Como “reguladores”, as autoridades portuárias podem alavancar tarifas e incentivos para suportar medidas de baixo ou zero carbono e atualizar os padrões ambientais e de segurança na cadeia de valor dos combustíveis alternativos. Os portos podem criar processos (com suporte digital) que ajudem outras partes interessadas a tornarem-se mais eficientes (em termos energéticos), sem necessariamente mudarem para fontes de energia com baixo/zero carbono. Os portos, enquanto “facilitadores”, podem iniciar colaborações, parcerias e consórcios para alinhar os objetivos climáticos, prever a procura de energia e coadministrar projetos de combustíveis alternativos. Os portos capacitados em fornecer energia podem expandir a comunidade portuária convidando atores

“energéticos” e rastrear fluxos de energia por meio de inteligência de *Big Data* e tecnologias *blockchain*, etc [64].

A implementação de políticas, como incentivos, é um passo vital para a descarbonização do transporte marítimo. Os regimes de incentivos (taxas portuárias ambientalmente diferenciadas) e subvenções são estabelecidos para acelerar a aceitação e apoiar investimentos na adoção de tecnologias em portos, transportes terrestres e navios. Considerando o papel que os portos desempenham na descarbonização dos navios, há um foco internacional nos incentivos portuários para os navios. Os incentivos iniciados pela indústria baseiam-se principalmente em índices ambientais iniciados por portos, governo, indústria e/ou ONGs.

Como exemplo, de regime de incentivo, destaca-se o índice ambiental de navios (ESI - Environmental Ship Index), lançado pela World Port Climate Initiative (WPCI) e pela International Association of Ports and Harbors (IAPH), em 1 de janeiro de 2011, cuja adesão indicava até 1 janeiro 2024, 6350 navios com pontuações válidas e 71 provedores de incentivos. O Índice Ambiental de Navios (ESI) identifica os navios de longo curso que apresentam melhor desempenho na redução de emissões atmosféricas, do que o exigido pelos atuais padrões de emissão da IMO [73]. Os portos podem registrar-se como provedores de incentivos a navios certificados, onde verificam o consumo de combustível e as emissões atmosféricas. O índice tem uma pontuação que varia de 0 a 100 e, com base na pontuação, os portos dão incentivos como reduções percentuais nas taxas portuárias (que variam de porto para porto). Alguns importantes portos no mundo, utilizam o ESI, como base para incentivos aos navios [72]. No Brasil fazem parte os portos de Pecém, Açu, Suape, Itaqui e São Sebastião conforme Figura 33.



Figura 33 - Portos participantes do regime de incentivo ESI para navios [74]

Também no Brasil, em uma iniciativa liderada³⁵ pelo Porto do Itaqui, foi criada em março de 2024, a “Aliança para Descarbonização de Portos Brasileiros (ABDP)”. A Aliança visa reunir portos, empresas e organizações para discutir e promover a redução de emissões de gases de efeito estufa no setor portuário e aquaviário brasileiro [75]. A Aliança é inspirada na *Alianza Net Zero Mar* - associação espanhola, sem fim lucrativos, tendo como objetivo acelerar a descarbonização e eletrificação do setor marítimo-portuário, colaborando com empresas e instituições que queiram unir esforços para reduzir as emissões poluentes geradas pelas infraestruturas portuárias e marítimas, em portos da Espanha [76]. As atividades da *Alianza Net Zero Mar*, incluem:

- Apoio técnico aos membros para acelerar a descarbonização dos transportes marítimos e portos;
- Atividades de comunicação e treinamento;
- Grupos de trabalho sobre temas específicos de interesse dos associados, estudos e publicações;
- Apoiar o desenvolvimento de critérios uniformes no quadro legislativo, sobre questões de segurança, desenvolvimento de estruturas fiscais, financeiras ou de ajuda para acelerar a descarbonização dos transportes marítimos e dos portos;
- Criar uma plataforma de intercâmbio de informação, a promoção de uma opinião favorável, a análise do quadro legislativo, uma fonte de estatísticas e informação atualizada sobre a descarbonização no setor marítimo-portuário;
- Definir um roteiro para alcançar a descarbonização do setor do ponto de vista tecnológico, regulatório e econômico.

Podemos destacar algumas medidas sendo implementadas em portos brasileiros. Um exemplo é o sistema Portolog, que visa melhorar o acesso portuário terrestre. O sistema realiza “*o agendamento e sequenciamento de acesso de caminhões, a fim*

³⁵ O Porto do Itaqui se prepara para lançar o seu plano de descarbonização, pioneiro no Brasil entre os portos. O principal objetivo é reduzir as emissões de gases de efeito estufa em todo o complexo portuário. Sua elaboração é resultado de uma parceria inédita no Brasil, com o Porto de Valência (Espanha), que através da Fundação Valência Port, apresentou recentemente um estudo sobre a “pegada de carbono” do Porto do Itaqui, em que avaliou as emissões de GEE, de acordo com os critérios dos Escopos 1, 2 e 3 do GHG Protocol – uma metodologia amplamente reconhecida para monitoramento de emissões. De acordo com os resultados, as emissões diretas (Escopo 1) representaram 0,3% do total de emissões do porto, enquanto as indiretas relacionadas ao consumo de eletricidade (Escopo 2) corresponderam a 0,1%. As demais emissões indiretas (Escopo 3), que englobam fornecedores e atividades de terceiros, totalizaram 99,6%. Com os resultados obtidos, o projeto caminha para a finalização e lançamento do plano de descarbonização [104].

de sincronizar as datas de chegada dos navios e das cargas nos terminais, a programação e o credenciamento de veículos para uso racional e utilização da plena capacidade de acesso ao porto” [77]. Outro programa importante para melhor a eficiência portuária é o Programa Porto Sem Papel. *“Trata-se da integração com pagamento da guia de recolhimento do Fundo para Aparelhamento e Operacionalização das Atividades-fim da Polícia Federal (Funapol), que tem a proposta de transmitir informações referentes aos pagamentos de taxas de forma ágil, além de proporcionar maior celeridade o registro das informações de chegada das embarcações estrangeiras nos portos brasileiros”* [78]. Esses programas, aliado a leilões de novas áreas em portos públicos, e novas autorizações de TUPs, permitem que o sistema portuário brasileiro fique mais eficiente.

8. Trajetórias para o Transporte Aquaviário Brasileiro

No horizonte dos estudos da EPE (PDE³⁶ e PNE³⁷) o atendimento da demanda por combustível marítimo (embarcações nacionais e estrangeiras) é distribuído pelos diversos segmentos do transporte aquaviário que operam no País: navegação de longo curso, cabotagem, navegação interior, transporte de passageiros, navegação de apoio portuário e marítimo. As projeções do PDE 2034, apontam que a atividade do transporte aquaviário de cargas (navegação de longo curso, cabotagem e interior) mantém sua curva ascendente, favorecida principalmente, pelo aumento do escoamento de produtos agrícolas, fertilizantes, petróleo e minério de ferro. A condição do Brasil como exportador líquido de petróleo ao longo do período decenal e a necessidade de importação de volumes consideráveis de derivados de petróleo (nomeadamente óleo diesel), eleva ainda mais a importância do transporte aquaviário. Observa-se a relevância da infraestrutura logística aquaviária que compõe o Arco Norte (acima do Paralelo 16ºS) para a exportação de produtos como a soja e o milho, bem como a importância dos portos localizados no eixo Sul-Sudeste, na movimentação de todo o tipo de cargas.

Conforme citado anteriormente, a utilização de combustíveis alternativos para a descarbonização do transporte marítimo é uma das metas para a redução dos gases de efeito estufa. Dentre esses combustíveis, GNL, hidrogênio, metanol, amônia, biocombustíveis e eletricidade apresentam-se como as principais alternativas. No caso do Brasil, os biocombustíveis (biodiesel e etanol) são considerados uma alternativa relevante, pois a indústria de biocombustíveis encontra-se bem estabelecida.

³⁶ Plano Decenal de Expansão de Energia [6]

³⁷ Plano Nacional de Energia [106]

8.1. Metodologia

Para construção das diversas trajetórias para o transporte aquaviário nacional, utiliza-se de metodologia de projeção, desenvolvida na EPE, que contempla uma estimativa da demanda por atividade aquaviária e movimentação portuária a partir de informações da Antaq [9], e de abastecimentos de embarcações a partir de dados do Balanço Energético Nacional (BEN) [79] [80], conforme ilustrada na Figura 34.



Figura 34 - Metodologia aplicada às trajetórias de atendimento da demanda energética por combustíveis alternativos

Divide-se essa atividade em cabotagem e apoio marítimo, especialmente para a indústria de óleo e gás, cabotagem geral, navegação interior e longo curso interior, além da demanda por longo curso, e do transporte de passageiros.

O exercício das trajetórias foi baseado nas premissas do PDE 2034, e estendido a partir das discussões preliminares de cenários para o PNE 2055. Utilizou como insumo diferentes planos de longo prazo de diferentes ministérios e órgãos públicos, além de contato com instituições públicas e privadas para escolha do cenário econômico. A partir das projeções econômicas globais e nacionais, de crescimento do comércio internacional, e de incremento da produção de petróleo, mineral e do agronegócio, entre outros, projeta-se taxas de crescimento da atividade de cada um dos segmentos.

O crescimento da demanda por atividade aquaviária é utilizado como base para a evolução da demanda energética. Assim, nesse estudo foram construídas 4 trajetórias - e mais uma acessória à trajetória 4, conforme Figura 35 – que analisam os impactos de diferentes formas de suprir essa demanda energética. Essas projeções contemplam os requisitos de redução dos GEE, especificamente a introdução de combustíveis de baixa emissão de carbono (combustíveis alternativos) na matriz do transporte aquaviário, para o período 2024-2050.

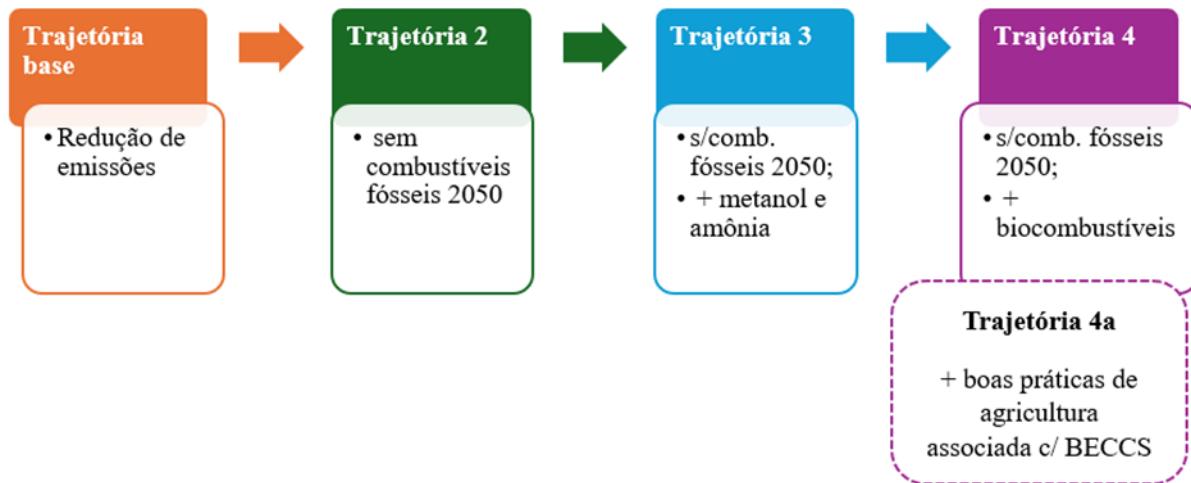


Figura 35 - Trajetórias de atendimento da demanda por combustíveis marítimos de baixa emissão (combustíveis alternativos)

8.1.1. Trajetória 1 - Base

A trajetória Base foi elaborada considerando as políticas e compromissos de descarbonização e os investimentos atuais. Neste contexto, no curto prazo, haverá entrada em operação de novas embarcações, movidas a combustível convencional, dificultando a eliminação do uso de combustíveis fósseis no transporte marítimo e de cabotagem (Figura 36).

Na navegação interior, haverá uma substituição gradual do óleo diesel marítimo por biodiesel, alcançando 90% de biodiesel e 10% de etanol em 2050, substituindo totalmente o diesel com combustível marítimo.

Para transporte de passageiros, está prevista a hibridização e eletrificação. A eletrificação será a principal forma de propulsão das barcas, e a hibridização e o uso do biodiesel reduzirão significativamente o uso de combustíveis fósseis, particularmente na região Amazônica, onde a eletrificação total das embarcações ainda é um desafio devido às longas distâncias.

Na cabotagem, a mistura de biodiesel no combustível bunker terá início em 2026, com um objetivo de 30% de mistura de biodiesel ao bunker até 2038. Além disso, novas embarcações de grande porte, entregues a partir de 2034, utilizarão combustíveis alternativos, como etanol, metanol, amônia e hidrogênio, lentamente reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. Apesar de haver algum uso de óleo combustível misturado ao biodiesel em 2050.

No longo curso, o biodiesel será usado no curto prazo, enquanto o GNL será a opção de médio prazo. Embarcações de grande porte, previstas para serem entregues a partir de 2034, também passarão a adotar combustíveis alternativos com destaque

para metanol, amônia e hidrogênio. Esta trajetória considera o uso de bunker, com uma mistura de 30% de biodiesel e 70% de óleo combustível.

Sem modificar o desenho de tendência atual do setor, que é de redução significativa de emissões, essa trajetória fornece uma referência de tamanho do desafio para a transição energética, e contribui para o entendimento de que a necessidade do uso de combustíveis fósseis perdure no longo prazo.

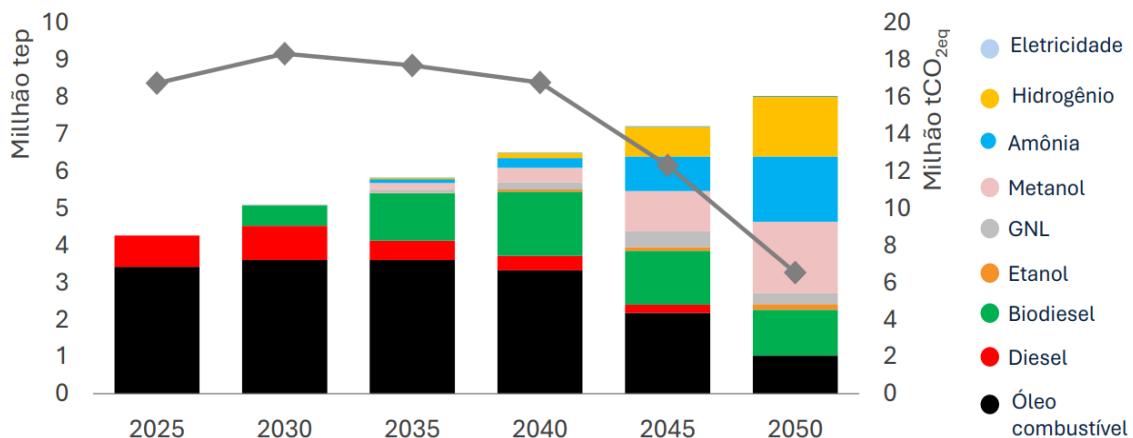


Figura 36. Evolução do consumo energético e das emissões do transporte aquaviário na trajetória 1 – com combustíveis fósseis em 2050

8.1.2. Trajetória 2 – Sem Combustíveis Fósseis em 2050

A trajetória 2 foi criada para analisar a possibilidade de eliminação dos combustíveis fósseis como fonte energética de embarcações no Brasil até 2050, permitindo que diferentes portos utilizem distintos combustíveis, motivando o emprego de maior diversidade de fontes energéticas (Figura 37).

Na navegação interior, projeta-se uma substituição gradual do óleo diesel marítimo por biodiesel, com a meta de alcançar uma proporção de 90% biodiesel e de 10% etanol até 2050.

Nesta trajetória, para o transporte de passageiros, está planejada a hibridização e eletrificação das embarcações. A introdução do etanol hidratado, além do biodiesel, como combustível permitirá que a navegação na região amazônica prescinda de combustíveis fósseis. A hibridização aumentará no transporte de passageiros em algumas cidades onde a eletrificação ainda é desafiadora.

Na cabotagem, a mistura de biodiesel no bunker começará em 2026, com o objetivo de atingir 30% em 2038. Além disso, novas embarcações de grande porte, entregues a partir de 2034, utilizarão combustíveis alternativos, como etanol, metanol, amônia e hidrogênio. A combinação dessas alternativas permite a redução a zero da utilização de combustíveis fósseis.

No longo curso, o biodiesel será utilizado no curto prazo, enquanto o GNL será a escolha para o médio prazo. A partir de 2034, embarcações de grande porte também passarão a adotar combustíveis alternativos, incluindo etanol, metanol, amônia e hidrogênio. A conversão de embarcações antigas, e o uso desses combustíveis, particularmente o biodiesel e etanol, permitem a eliminação o uso de combustíveis fósseis.

Na trajetória 2, a eliminação total do uso de combustíveis fósseis promove uma redução significativa das emissões durante a década de 2040, particularmente nos últimos cinco anos do período de estudo. Essa combinação de novos combustíveis permite que as emissões se reduzam significativamente (91% em relação ao combustível fóssil), no entanto ainda não consegue atingir emissões zero.

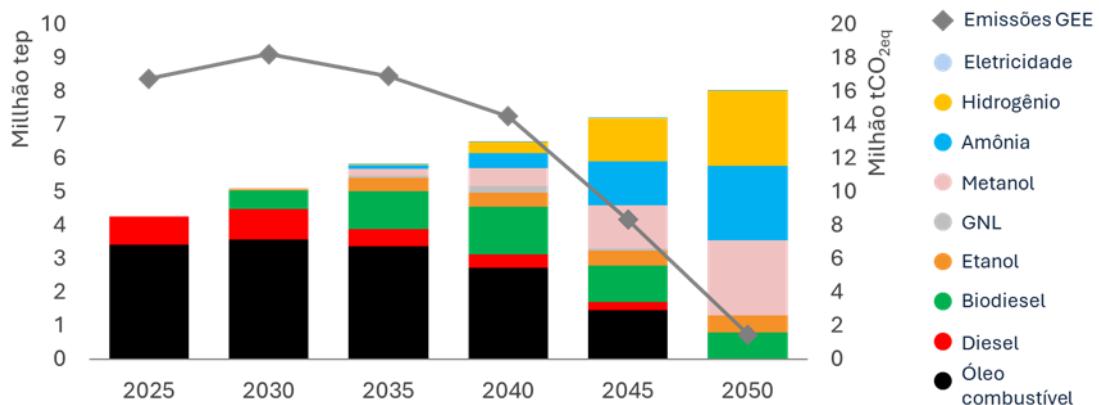


Figura 37 - Evolução do consumo energético e das emissões do transporte aquaviário na trajetória 2 - Sem combustíveis fósseis em 2050

8.1.3. Trajetória 3 – Sem Combustíveis Fósseis em 2050 – Priorizando Metanol

A trajetória 3 teve como enredo a exclusão do uso de combustíveis fósseis no setor, no entanto, com redução da diversidade de fontes energéticas a serem utilizadas para transporte aquaviário (Figura 38). Tal contexto busca apresentar uma trajetória em que haverá uma racionalização dos investimentos em tancagem e abastecimento em portos, sendo aparentemente favorável ao Brasil.

Não há alterações na navegação interior ou no transporte de passageiros comparando esta trajetória com a anterior. O uso de biodiesel, diesel verde e etanol permanece, permitindo a eliminação de combustíveis fósseis no período analisado.

Na cabotagem, o biodiesel permitirá que o segmento reduza suas emissões rapidamente no curto prazo. No entanto, ao invés de depender de diversos combustíveis diferentes, a cabotagem no Brasil irá se concentrar no uso do metanol

e etanol, por sua maior viabilidade em embarcações de porte significativo com distâncias não tão longas.

No longo curso, metanol e amônia, além de um pouco de etanol, tendem a ser as soluções de destaque, permitindo uma descarbonização significativa. A queima direta de hidrogênio perde espaço em relação à trajetória anterior.

Essa trajetória permite que as emissões caiam mais rapidamente e há redução dos custos em infraestrutura, pois os diferentes portos poderão optar por dois combustíveis somente, diminuindo o custo de adaptação para esses novos combustíveis e com nível de emissões similar em 2050 (90% em relação ao combustível fóssil).

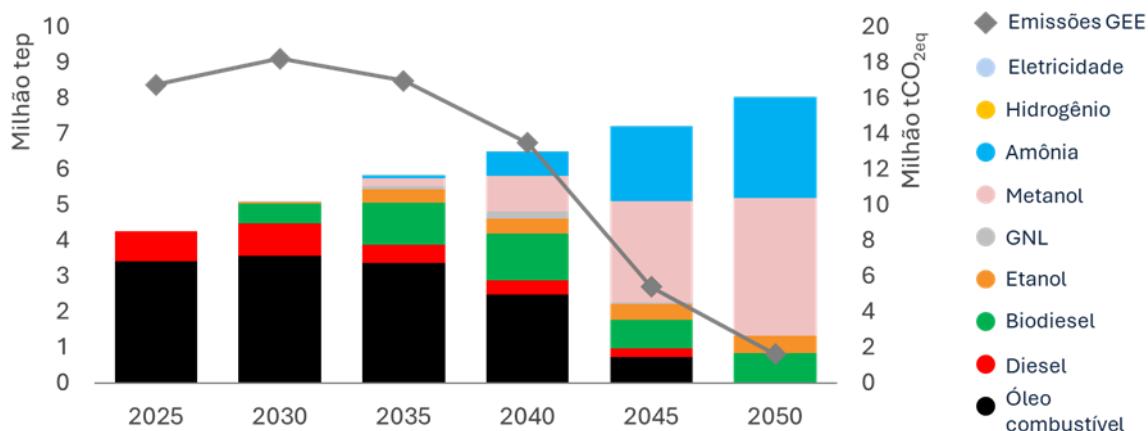


Figura 38 - Evolução do consumo energético e das emissões do transporte aquaviário na trajetória 3 - Sem combustíveis fósseis em 2050, priorizando metanol e amônia

8.1.4. Trajetória 4 - Sem Combustíveis Fósseis em 2050 - Priorizando Biocombustíveis

A trajetória 4 foi elaborada com o intuito de demonstrar o potencial de descarbonização do Brasil utilizando um diferencial estratégico e competitivo do País: os biocombustíveis (Figura 39).

Na navegação interior e no transporte de passageiros, assim como na trajetória 3, utilizou-se o etanol e o biodiesel para descarbonizar o segmento.

Na cabotagem, por sua vez, esta trajetória apresenta um contexto bastante distinto. A partir de 2045, os combustíveis fósseis podem ser totalmente substituídos por 80% de biodiesel e/ou diesel verde e 20% de etanol. A utilização de somente biodiesel e etanol no longo curso é questão desafiadora, uma vez que nem todos os outros países com os quais o Brasil apresenta relações comerciais têm o mesmo potencial de oferta de biocombustíveis para o abastecimento das embarcações. Portanto, portos

voltados ao comércio exterior precisarão ofertar vários combustíveis, apesar de ser possível ampliar o uso de biodiesel e etanol. Em 2050, projeta-se 29% de uso de biodiesel, 22% de metanol, 22% de amônia, 6% de hidrogênio, e 21% de etanol. Dessa forma, e utilizando os fatores de emissão atuais dos biocombustíveis brasileiros, a redução de emissões (81% em relação ao combustível fóssil) é inferior a observada nas duas trajetórias anteriores, uma vez que nas trajetórias anteriores há uso mais expressivo de metanol verde, hidrogênio verde e amônia verde, combustíveis alternativos com emissões bastante reduzidas.

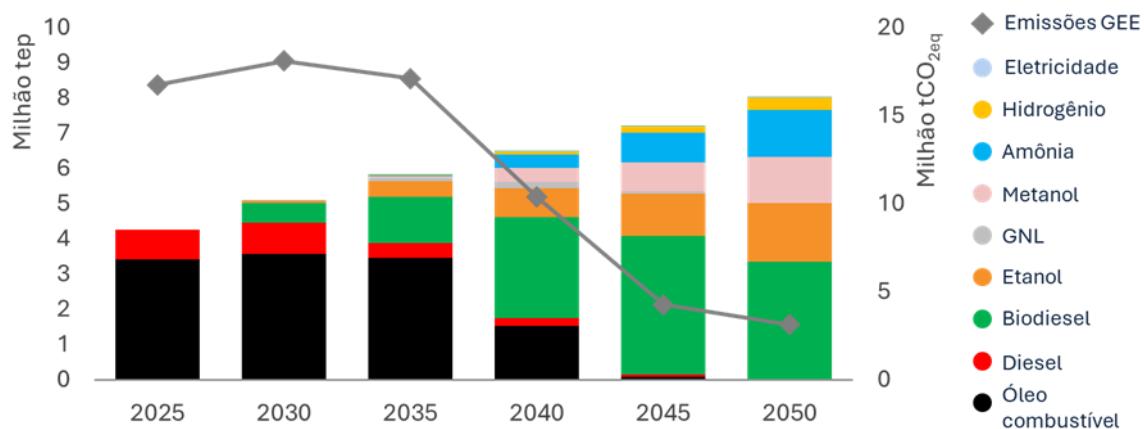


Figura 39 - Evolução do consumo energético e das emissões do transporte aquaviário na trajetória 4 - Sem combustíveis fósseis em 2050, priorizando biocombustíveis

No entanto, é possível reduzir as emissões dos biocombustíveis brasileiros de forma ainda mais significativa, com atingimento de um balanço de emissões do etanol negativo (Figura 40). Isso pode ser alcançando a partir do uso de biocombustíveis tradicionais cultivados com a aplicando as melhores práticas e tecnologias agrícolas sustentáveis, com alto potencial de mitigação das emissões de GEEs, do uso de biocombustíveis de segunda geração, em combinação com captura e armazenamento geológico de dióxido de carbono proveniente da biomassa (BioEnergy with Carbon Capture and Storage – BECCS).

Adotando esta trajetória, constata-se que as emissões do setor aquaviário brasileiro atingem valores negativos (com redução 102% de em relação ao combustível fóssil) por meio do uso de biocombustíveis e BECCS.

Ao apostar nas soluções domésticas, com tecnologias conhecidas, e com custos significativamente menores de infraestrutura e de disponibilização de combustível em volumes suficientes, o País poderá disponibilizar o montante de emissões negativas do transporte aquaviário como um importante ativo para a transição energética e nos debates acerca da necessidade de descarbonização mundial.

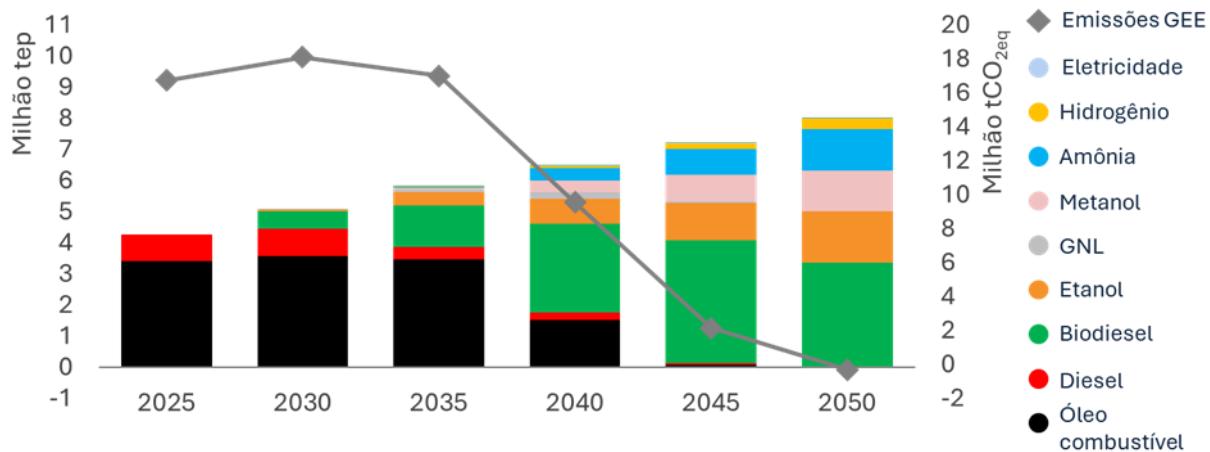


Figura 40 - Evolução do consumo energético e das emissões do transporte aquaviário na trajetória 4a - Sem combustíveis fósseis em 2050, priorizando biocombustíveis + melhores práticas de agricultura combinadas com BECCS

Assim, a perspectiva de análise de diferentes trajetórias é essencial para o planejamento e a previsão de demanda de combustíveis marítimos pois, incorpora diversos elementos, buscando o equilíbrio entre a oferta e a demanda, administrando incertezas e proporcionando uma visão de futuro.

Ressalta-se o momento delicado, pelo qual o setor marítimo mundial atravessa: um ambiente com conflitos geopolíticos e de intensificação das alterações climáticas, que acrescentam mais desafios e barreiras a serem vencidos para cumprir às regulamentações de descarbonização e mitigação dos gases de efeito estufa. A descarbonização do transporte aquaviário precisará evoluir, apesar das incertezas, barreiras e desafios para a penetração de combustíveis de baixa emissão (combustíveis alternativos), onde a neutralidade tecnológica e a diversidade de opções devem ser princípios a serem seguidos. A posição de destaque do Brasil, em termos de biotecnologia, bioenergia e uma indústria de biocombustíveis consolidada e competitiva, pode contribuir para descarbonização do setor. Ademais, práticas avançadas na cadeia de biocombustíveis permitem que o país alcance emissões negativas, conforme descrito na trajetória 4a.

A Quadro 4 apresenta uma síntese comparativa das trajetórias propostas para o período 2024 - 2050.

Quadro 4 - Consolidação das trajetórias projetadas

Trajetória	Uso de combustíveis	Navegação interior	Cabotagem	Longo curso	Redução emissões GEE
Base	Redução de emissões	Gradual substituição do óleo diesel marítimo por biodiesel, atingindo 100% em 2050.	Mistura de biodiesel no <i>bunker</i> inicia-se em 2026, alcançando 30% em 2038. Novas embarcações de grande porte, entregues a partir de 2034, adotarão combustíveis alternativos (etanol, metanol, amônia e hidrogênio)	Uso de biodiesel no curto prazo e GNL no médio prazo. Novas embarcações de grande porte, entregues a partir de 2034, adotarão combustíveis alternativos (etanol, metanol, amônia e hidrogênio)	61%
2	Sem combustíveis fósseis em 2050	Gradual substituição de óleo diesel marítimo	Mistura de biodiesel no <i>bunker</i> inicia-se em 2026, alcançando 30% em 2038. Novas embarcações de grande porte, entregues a partir de 2034, adotarão combustíveis alternativos (etanol, metanol, amônia e hidrogênio)	Uso de biodiesel no curto prazo e GNL no médio prazo. Novas embarcações de grande porte, entregues a partir de 2034, adotarão combustíveis alternativos (etanol, metanol, amônia e hidrogênio)	91%
3	Sem combustíveis fósseis em 2050, priorizando metanol e amônia	por biodiesel e etanol, atingindo 90% e 10% em 2050	Gradual substituição do óleo diesel marítimo e <i>bunker</i> por biodiesel e etanol, alcançando 80% e 20% em 2050	Uso de biodiesel (30%), amônia (22%), metanol (22%), etanol (20%) e hidrogênio (6%) em 2050	90%
4	Sem combustíveis fósseis em 2050, priorizando biocombustíveis	Gradual substituição de óleo diesel marítimo	Gradual substituição do óleo diesel marítimo e <i>bunker</i> por biodiesel e etanol, alcançando 80% e 20% em 2050	Uso de biodiesel (30%), amônia (22%), metanol (22%), etanol (20%) e hidrogênio (6%) em 2050	81%
4a	Sem combustíveis fósseis em 2050, priorizando biocombustíveis + boas práticas na agricultura e BECCS (a partir de 2034)	por biodiesel e etanol, atingindo 80% e 20% em 2050			102%

9. Considerações Finais

O setor de transporte aquaviário, bastante relevante para o comércio no mundo, enfrenta desafios significativos relacionados às suas emissões de gases de efeito estufa, especialmente considerando o impacto ambiental e as metas mundiais de descarbonização. Adicionalmente, a intensificação das mudanças climáticas e questões geopolíticas contribuem para tornar o contexto ainda mais complexo, com diversas barreiras e desafios.

As regulamentações da IMO têm efeitos graduais sobre o transporte marítimo, influenciando países, todo o setor de transporte marítimo e a indústria naval a se adaptarem a normas mais rígidas para reduzir as emissões de GEE.

Novas tecnologias de propulsão e combustíveis de baixa emissão serão indispensáveis para a descarbonização das embarcações. Por um lado, os sistemas de propulsão, incluindo motores dual fuel, propulsão assistida pelo vento e lubrificação a ar são opções já disponíveis, que contribuem para incrementar a eficiência energética das embarcações, cabendo destacar a necessidade de uma renovação da frota existente e a construção de novos navios para alcance de reduções de emissões. Por sua vez, ainda há barreiras significativas, principalmente no que tange à adaptação aos combustíveis alternativos considerando aspectos relativos à densidade energética, segurança, padronização, custos, suprimento, abastecimento e ampliação na infraestrutura para seu uso.

A combinação de questões geopolíticas, desafios técnicos, limitações econômicas, de infraestrutura, e as diversas realidades em cada país e presentes em cada elo da cadeia do transporte marítimo, além da necessidade de um desenvolvimento contínuo e gradual das alternativas, representam o conjunto de fatores que indica que não se vislumbra uma solução única para a descarbonização, seja tecnologia de propulsão ou combustível marítimo alternativo. Provavelmente, o futuro do transporte aquaviário envolverá uma mistura de diferentes combustíveis alternativos e tecnologias, com a adoção de soluções híbridas e de transição que atendam de maneira eficaz e sustentável às necessidades do setor e sigam às especificidades de cada país/região. No que se refere à infraestrutura, acordos com países parceiros, podem contribuir para a implementação de corredores verdes, viabilizando a descarbonização entre portos.

No Brasil, o transporte aquaviário é caracterizado pela diversidade de embarcações e modalidades de transporte. As navegações de cabotagem, interior, longo curso têm um papel fundamental na movimentação de cargas e pessoas, impactando fortemente a economia nacional. Além disso, as embarcações de apoio portuário e marítimo são essenciais para suporte às embarcações nos portos e terminais aquaviários e, em especial, para apoio a produção offshore de petróleo e gás natural.

Neste contexto, a infraestrutura portuária nacional precisará de investimentos para adequação e melhorias, especificamente para atender embarcações com novas tecnologias e para abastecimento com combustíveis alternativos. No que tange ao fornecimento de combustíveis alternativos, ressalta-se que a produção crescente de biocombustíveis no Brasil desempenha um papel chave no processo de descarbonização do transporte marítimo mundial, oferecendo alternativas sustentáveis, de baixa emissão, para os combustíveis tradicionais. No entanto, o uso ampliado de biocombustíveis e outros combustíveis (como amônia, metanol) no transporte marítimo enfrenta desafios técnicos, econômicos e regulatórios.

Em uma perspectiva de análise do potencial de descarbonização do transporte marítimo nacional no longo prazo, foram construídas quatro trajetórias de usos de combustíveis alternativos (com uma análise de sensibilidade adicional) com vistas ao atendimento da demanda energética do transporte marítimo do País até 2050. Em análise destas trajetórias foi possível observar as diversas possibilidade de redução emissões em 2050, em maior ou menor monta, a depender do combustível a ser priorizado e da interrupção ou não do uso de combustíveis fósseis em 2050. O potencial de mitigação das emissões de GEEs para as trajetórias avaliadas esteve em patamares entre 61% e 103%, cabendo destacar, em especial, a trajetória adicional, fruto de análise de sensibilidade. Nesta trajetória, foi possível o atingimento de reduções negativas por meio de uma trajetória que prevê o uso mais expressivo de etanol e biodiesel associado com práticas sustentáveis na agricultura e tecnologias agrícolas sustentáveis. Esta combinação, com alto potencial de mitigação das emissões de GEEs, inclui a captura e armazenamento geológico de dióxido de carbono proveniente da biomassa.

Os resultados obtidos mostram-se relevantes para melhor entendimento das possibilidades nacionais. As trajetórias indicam que a descarbonização do setor é um desafio complexo, mas alcançável, principalmente com a diversificação das soluções energéticas para atender à demanda por combustíveis marítimos nas diferentes modalidades de transporte aquaviário. Este entendimento ratifica o que tem sido a tônica da estratégia da delegação brasileira junto à IMO, em sua defesa das possibilidades de contribuição dos biocombustíveis para uma transição energética mais ampla, justa e inclusiva e a relevante contribuição que o Brasil pode fornecer para a descarbonização do transporte marítimo mundial.

Com o avanço das tecnologias e o aumento do compromisso global, as perspectivas para a redução das emissões de GEE no transporte marítimo são promissoras, mas exigem um esforço coordenado em todas as frentes — do desenvolvimento de tecnologias até a regulamentação, passando pela adaptação da infraestrutura e da capacitação do setor. É essencial que políticas públicas e ações concretas sejam adotadas para garantir a viabilidade de um futuro marítimo mais sustentável, o que inclui a participação de todas as esferas governamentais, indústria, portos, institutos de pesquisas e universidades.

10. Bibliografia

- [1] E. Commission, “Europeam Commission - Energy - Transport,” Europeam Commission, 06 September 2022. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/emissions-free-sailing-full-steam-ahead-ocean-going-shipping>. [Acesso em 05 Octuber 2023].
- [2] UNCTAD, “Review of Maritime Transport 2024,” United Nations publication, Geneva, 2024.
- [3] UNCTAD, “unctad.org,” Setembro 2023. [Online]. Available: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023>. [Acesso em 29 Setembro 2023].
- [4] BNDES, “Rebocadores Portuários e Marítimos,” Setembro 2017. [Online]. Available: <https://bibliotecadigital.economia.gov.br/handle/123456789/527292>. [Acesso em 07 Abril 2025].
- [5] BNDES, “Mercado de Embarcações de Apoio a Plataformas de Petróleo e Gás Natural,” Março 2020. [Online]. Available: <https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/19820>. [Acesso em 27 Março 2025].
- [6] EPE, “Plano Decenal de Expansão de Energia - PDE2034,” 2024. [Online]. Available: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034>.
- [7] Abeam/Syndarma, “Frota de Embarcações de Apoio Marítimo no Brasil,” Dezembro 2024. [Online]. Available: <https://abeam.org.br/>. [Acesso em 27 Março 2025].
- [8] ANTAQ, “Anuário 2023. Estatísticas dos portos e das navegações em 2023,” 7 Fevereiro 2024. [Online]. Available: <https://www.gov.br/antaq/pt-br/central-de-conteudos/publicacoes-da-antaq/Anurio2023vfcompleta.pdf>. [Acesso em 18 Novembro 2024].
- [9] ANTAQ, “Painel Estatístico Aquaviário,” 2024. [Online]. [Acesso em 19 Novembro 2024].

- [10] UNCTAD, “Maritime profile: Brazil,” 11 Outubro 2024. [Online]. Available: <https://unctadstat.unctad.org/CountryProfile/MaritimeProfile/en-GB/076/index.html>. [Acesso em 19 Novembro 2024].
- [11] Petrobras, “Combustíveis Marítimos - informações técnicas,” 2021. [Online]. Available: www.petrobras.com.br. [Acesso em 25 Novembro 2024].
- [12] ANP, “RESOLUÇÃO ANP Nº 903, DE 18 DE NOVEMBRO DE 2022 - DOU DE 23-11-2022,” 18 Novembro 2022. [Online]. Available: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-903-2022>. [Acesso em 25 Novembro 2024].
- [13] CNT, “Painel CNT de Combustíveis - Transporte Aquaviário,” 24 Agosto 2024. [Online]. Available: <https://www.cnt.org.br/painel-cnt-combustiveis-aquaviario>. [Acesso em 25 Novembro 2024].
- [14] Transpetro, “Informações em atendimento à ANP,” 2025. [Online]. Available: <https://transpetro.com.br/>. [Acesso em 25 Março 2025].
- [15] 3. Petroleum, “Histórico de volumes mensais,” 2025. [Online]. Available: <https://operacoesmaritimas.bravaenergia.com/>. [Acesso em 25 Março 2025].
- [16] Kincaid, “Expansão de terminais e aumento na demanda por combustíveis impulsionam crescimento de quase 40% nas manobras,” 23 Setembro 2024. [Online]. Available: <https://www.kincaid.com.br/expansao-de-terminais-e-aumento-na-demanda-por-combustiveis-impulsionam-crescimento-de-quase-40-nas-manobras/>. [Acesso em 27 Novembro 2024].
- [17] DNV, “Maritime Forecast to 2050,” DNV, Høvik, Norway, 2024.
- [18] DNV, “TECHNICAL REGULATORY NEWS No. 17/2023 – STATUTORY,” Julho 2023. [Online]. Available: <https://www.dnv.com/maritime>.
- [19] IMO, “Revised GHG reduction strategy for global shipping adopted,” 7 July 2023. [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/Revised-GHG-reduction-strategy-for-global-shipping-adopted-.aspx>. [Acesso em 2 Dezembro 2023].
- [20] IMO, “Guidelines on life cycle GHG intensity of marine fuels (LCA Guidelines),” [Online]. Available: <https://wwwcdn.imo.org/>. [Acesso em 27 Fevereiro 2024].
- [21] CLARKSONS, 2024. [Online]. Available: <https://www.clarksons.com/>. [Acesso em 7 Fevereiro 2024].

- [22] HELLENIC SHIPPING NEWS, 21 June 2021. [Online]. Available: <https://www.hellenicshippingnews.com/>. [Acesso em 16 Fevereiro 2024].
- [23] DNV, “DNV,” DNV, 9 January 2024. [Online]. Available: <https://www.dnv.com/>. [Acesso em 7 Fevereiro 2024].
- [24] IMO, “IMO approves net-zero regulations for global shipping,” 11 April 2025. [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/IMO-approves-netzero-regulations.aspx>. [Acesso em 17 Abril 2025].
- [25] SGMF, “MEPC 83: IMO NET-ZERO FUTURE,” 11 April 2025. [Online]. Available: [linkedin.com/feed/update/urn:activity:73164608556001593344/](https://www.linkedin.com/feed/update/urn:activity:73164608556001593344/). [Acesso em 17 Abril 2025].
- [26] Nautilus Shipping, “Marine Propulsion Systems,” 16 December 2022. [Online]. Available: <https://www.nautilusshipping.com/marine-propulsion-systems>. [Acesso em 28 Fevereiro 2024].
- [27] Q. e. al., “Os derivados de Petróleo,” em *Processamento de Petróleo e Gás*, Rio de Janeiro, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2012, p. 258.
- [28] WÄRTZILA, “Controllable Pitch Propeller Systems,” [Online]. Available: <https://www.wartsila.com/marine/products/propulsors-and-gears/propellers/wartsila-controllable-pitch-propeller-systems>. [Acesso em 2024 Fevereiro 29].
- [29] Marine Insight, “How Ship’s Engine Works?,” 22 May 2019. [Online]. Available: <https://www.marineinsight.com/main-engine/how-ships-engine-works/>. [Acesso em 28 Fevereiro 2024].
- [30] J. Kalsing, “Análise da viabilidade de manter motores ciclo diesel em operação nos serviços extrapesados, diante da atual deficiência energética apresentada por baterias,” 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/collections/67ada40e-8de1-40ec-8381-1f6323482b5d>. [Acesso em 28 Fevereiro 2024].
- [31] MAN, “Our dual fuel engines: Delivering high performance, efficiency and versatility,” [Online]. Available: <https://www.man-es.com/energy-storage/products/dual-fuel-engines>. [Acesso em 1 Março 2024].
- [32] DNV, “Challenging road ahead for retrofitting to dual-fuel engines,” 16 May 2023. [Online]. Available: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/challenging-road-ahead-for-retrofitting-to-dual-fuel-engine.html#>. [Acesso em 1 Março 2024].

- [33] MAN, “Potential-for-dual-fuel-conversions-of-marine-engines,” March 2023. [Online]. Available: <https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/potential-for-dual-fuel-conversions-of-marine-engines.pdf>. [Acesso em 1 Março 2024].
- [34] ACCELLERON, “Present and future fuels in the shipping industry: Dual Fuels,” 18 April 2023. [Online]. Available: <https://acceleron-industries.com/charge-magazine/present-and-future-fuels-in-the-shipping-industry-dual-fuels>. [Acesso em 1 Março 2024].
- [35] L. van Biert e K. Visser, “Fuel cells systems for sustainable ships,” em *Sustainable Energy Systems on Ships*, Elsevier, 2022, pp. 81-121.
- [36] A. G. Elkafas, M. Rivarolo, E. Gadducci, L. Magistri e A. F. Massardo, “Fuel Cell Systems for Maritime: A Review of Research Development, Commercial Products, Applications, and Perspectives,” *Processes*, 2023.
- [37] EIDESVIK OFFSHORE ASA, “Eidesvik.no,” Eidesvik, 2024. [Online]. Available: <http://eidesvik.no>. [Acesso em 24 Janeiro 2024].
- [38] VALE, “Vale,” Vale.com, 30 junho 2021. [Online]. Available: <https://vale.com/>. [Acesso em 1 Dezembro 2023].
- [39] Marine Insight, “Marine Insight,” Marine Insight, 24 January 2021. [Online]. Available: <https://www.marineinsight.com/>. [Acesso em 30 January 2024].
- [40] A. e. al., “Measurement technologies for pipeline transport of carbon dioxide-rich mixtures for CCS,” *Flow Measurement and Instrumentation*, p. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102515>, 23 December 2023.
- [41] B. e. al., “Climate action for the shipping industry: Some perspectives on the role of nuclear power in maritime decarbonization,” *e-Prime - Advances in Electrical, Engineering, Electronics and Energy*, p. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100132>, 1 March 2023.
- [42] Amazônia Azul, “Pequenos reatores nucleares,” Amazonia Azul Tecnologias de Defesa S.A, 26 Abril 2023. [Online]. Available: <https://www.amazul.mar.mil.br/>. [Acesso em 1 Fevereiro 2024].
- [43] IEEE, “The Case For Nuclear Cargo Ships,” 20 January 2024. [Online]. Available: <https://spectrum.ieee.org>. [Acesso em 1 Fevereiro 2024].
- [44] C. a. p. d. D. GL, “Alternativas de descarbonização para o setor de transporte marítimo no Brasil,” 9 Novembro 2023. [Online]. Available:

- <https://www.cebri.org/br/doc/333/alternativas-de-descarbonizacao-para-o-setor-de-transporte-maritimo-no-brasil>. [Acesso em 19 Novembro 2024].
- [45] M. & Yfantis, "Decarbonization in Shipping Industry: A Review of Research, Technology Development, and Innovation Proposals," *Journal of Marine of Science and Engineering*, pp. J. Mar. Sci. Eng. 2021, 9(4), 415; <https://doi.org/10.3390/jmse9040415>, 13 April 2021.
- [46] DNV, "DNV," DNV, 2019 Octuber 2019. [Online]. Available: <http://www.dvn.com.br>. [Acesso em 23 Janeiro 2024].
- [47] WEI, "Análise comparativa do porto ao navio de combustíveis alternativos para transporte marítimo," COPPE/UFRJ. Programa de Planejamento Energético, Abril 2021. [Online]. Available: Dissertação de Mestrado. .
- [48] EPE, "https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-763/FS-EPE-DPG-SDB-2023-04-Combust%C3%ADveis_Sint%C3%A9ticos_2023.08.30_PT.pdf," 2023. [Online]. Available: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-763/FS-EPE-DPG-SDB-2023-04-Combust%C3%ADveis_Sint%C3%A9ticos_2023.08.30_PT.pdf. [Acesso em 31 março 2025].
- [49] F. Carvalho, E. Muller-Casseres, M. Poggio, T. Nogueira, C. Fonte, H. Ken Wei, J. Portugal-Pereira, P. R.R. Rochedo, A. Szklo e R. Schaeffer, "Prospects for carbon-neutral maritime fuels production in Brazil," *Journal of Cleaner Production*, vol. 326, 1 dezembro 2021.
- [50] B. Veritas, "Marine & Offshore. Are biofuels ready for use in shipping?," 7 July 2022. [Online]. Available: <https://marine-offshore.bureauveritas.com/magazine/are-biofuels-ready-use-shipping>.
- [51] ANP, "ANP aprova uso experimental de biodiesel B100 na navegação fluvial," Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, 2024. [Online]. Available: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/anp-aprova-uso-experimental-de-biodiesel-b100-na-navegacao-fluvial. [Acesso em 7 novembro 2024].
- [52] ANP, "ANP autoriza comercialização de combustível marítimo com biodiesel," Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, 2024. [Online]. Available: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/anp-autoriza-comercializacao-de-combustivel-maritimo-com-biodiesel. [Acesso em 7 novembro 2024].

- [53] R. Borher e A. Pinho Alho, *UMA METODOLOGIA DE ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS PARA A REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO2 POR NAVIOS*, UFRJ, 2022.
- [54] EPE, “Panorama do Biometano no Setor Sucroenergético,” 2023. [Online]. Available: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-781/Panorama%20de%20Biometano.pdf>. [Acesso em 11 novembro 2024].
- [55] I. Bioenergy, IEA Bioenergy, 2025. [Online]. Available: <https://task33.ieabioenergy.com/database/>. [Acesso em 31 março 2025].
- [56] A. Foretich, G. G. Zaires, T. R. Hawkins e E. Newes, “Challenges and opportunities for alternative fuels in the,” *Maritime Transport Research*, 2021.
- [57] MPA Singapore, 12 January 2024. [Online]. Available: <https://www.mpa.gov.sg/>. [Acesso em 23 Fevereiro 2024].
- [58] Agência Gov, “Petrobras avança em testes de combustível marítimo com conteúdo renovável,” 14 Dezembro 2023. [Online]. Available: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202312/petrobras-avanca-em-testes-de-combustivel-maritimo-com-conteudo-renovavel-1>. [Acesso em 27 Fevereiro 2024].
- [59] A. Petrobras, “Petrobras obtém autorização para comercializar bunker com conteúdo renovável,” 11 Julho 2024. [Online]. Available: <https://agencia.petrobras.com.br/w/negocio/petrobras-obtem-autorizacao-para-comercializar-bunker-com-conteudo-renovavel-1>.
- [60] Petrobras, “Petrobras realiza comercialização de bunker com conteúdo renovável,” 25 Julho 2024. [Online]. Available: <https://agencia.petrobras.com.br/w/negocio/petrobras-realiza-comercializacao-de-bunker-com-conteudo-renovavel>. [Acesso em 21 Novembro 2024].
- [61] VALE, “Vale realiza 1ª viagem com biocombustível para transporte de minério de ferro,” 30 Novembro 2023. [Online]. Available: <https://vale.com/pt/w/vale-realiza-1-viagem-com-biocombustivel-para-transporte-de-minerio-de-ferro>. [Acesso em 27 Fevereiro 2024].
- [62] Global Maritime Forum, “Annual Progress Report on Green Shipping Corridors,” Global Maritime Forum, Copenhagen, 2022.
- [63] DNV, “Key considerations for establishing a green shipping corridor,” DNV, 2024. [Online]. Available: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/key-considerations-for-establishing-a-green-shipping-corridor/>. [Acesso em 06 Novembro 2024].

- [64] The Maritime Executive, LLC, “The Maritime Executive, LLC,” The Maritime Executive, LLC, 24 March 2023. [Online]. Available: <https://maritime-executive.com>. [Acesso em 8 Fevereiro 2024].
- [65] O. Energy, “Rotterdam-Singapore green corridor conducts pilot liquefied biomethane bunkering,” 28 November 2024. [Online]. Available: <https://www.offshore-energy.biz/rotterdam-singapore-green-corridor-conducts-pilot-liquefied-bio-methane-bunkering/>. [Acesso em 29 Novembro 2024].
- [66] “Pecem,” 1 Julho 2024. [Online]. Available: <https://www.complexodopecem.com.br/complexo-do-pecem-e-porto-de-sines-de-portugal-assinam-memorando-de-entendimento-para-desenvolver-corredor-logistico-sustentavel/>. [Acesso em 29 Novembro 2024].
- [67] G. M. Forum, “Global Maritime Forum - Insight brief,” Global Maritime Forum, September 2023. [Online]. Available: https://cms.globalmaritimeforum.org/wp-content/uploads/2023/09/Global-Maritime-Forum_Insight-Brief_National-and-regional-policy-for-green-shipping-corridors-1.pdf. [Acesso em 05 October 2023].
- [68] IEA, “International Energy Agency,” IEA, 11 July 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org>. [Acesso em 7 Fevereiro 2024].
- [69] POSEIDON PRINCIPLES, “POSEIDON PRINCIPLES,” POSEIDON PRINCIPLES, [Online]. Available: <https://www.poseidonprinciples.org>. [Acesso em 7 Fevereiro 2024].
- [70] coZEV, “Cargo Owners for Zero Emission Vessels,” coZEV, [Online]. Available: <https://www.cozev.org/>. [Acesso em 7 Fevereiro 2024].
- [71] GLOBAL MARITIME FORUM, “GLOBAL MARITIME FORUM,” GLOBAL MARITIME FORUM, [Online]. Available: <https://www.globalmaritimeforum.org/getting-to-zero-coalition>. [Acesso em 7 Fevereiro 2024].
- [72] A. e. al., “Ports’ role in shipping decarbonisation: A common port incentive scheme for shipping greenhouse gas emissions reduction,” *Cleaner Logistics and Supply Chain*, pp. Volume 3, March 2022, 100021. <https://doi.org/10.1016/j.clsn.2021.100021>, 2022.
- [73] ESI, “Environmental Ship Index,” [Online]. Available: <https://environmentalshipindex.org/>.
- [74] ESI, “Environmental Ship Index,” Environmental Ship Index, [Online]. Available: <https://www.environmentalshipindex.org/>. [Acesso em 8 Fevereiro 2024].

- [75] Governo do Maranhão, “Governo do Maranhão,” Governo do Maranhão, 12 Janeiro 2024. [Online]. Available: <https://www.ma.gov.br/>. [Acesso em 15 Fevereiro 2024].
- [76] Alianza Net-Zero MAR, “Alianza Net-Zero MAR,” Alianza Net-Zero MAR, 2024. [Online]. Available: <https://netzeromar.org/>. [Acesso em 15 Fevereiro 2024].
- [77] G. Brasil, “Cadeia Logística Portuária Inteligente - PortoLog,” Julho 2023. [Online]. Available: <https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/assuntos/transporte-aquaviario/inteligencia-logistica/cadeia-logistica-portuaria-inteligente-portolog>. [Acesso em 2025].
- [78] g. Brasil, “Transformação Digital. Porto Sem Papel reduz tempo de operações e aumenta eficiência da plataforma,” 1 Novembro 2022. [Online]. Available: <https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/assuntos/transporte-aquaviario/porto-sem-papel>. [Acesso em 2025].
- [79] EPE, “Balanço Energético Nacional - BEN,” 2024. [Online]. Available: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>.
- [80] EPE, “Balanço Energético Nacional 2024 - Ano base 2023,” 2024. [Online]. [Acesso em 2024].
- [81] E. Commission, “The European Green Deal,” European Commission, 2021. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en. [Acesso em 10 Outuber 2023].
- [82] E. Council, “Infographic - Fit for 55: increasing the uptake of greener fuels in the aviation and maritime sectors,” European Council, 12 October 2023. [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/fit-for-55-refueleu-and-fueleu/>. [Acesso em 17 October 2023].
- [83] E. Commission, “Methane Emissions,” 2024. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/carbon-management-and-fossil-fuels/methane-emissions_en. [Acesso em 22 Outubro 2024].
- [84] N. R. Fulbright, “The EU Methane Reduction Regulation is now in force, what is the impact on LNG imports to the EU?,” August 2024. [Online]. Available: <https://www.nortonrosefulbright.com/en/knowledge/publications/e25fed92/the-eu-methane-reduction-regulation-is-now-in-force-what-is-the-impact-on-lng-imports-to-the-eu>. [Acesso em 22 Novembro 2024].
- [85] EUR-Lex, “Regulation (EU) 2024/1787 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 on the reduction of methane emissions in the energy sector

- and amending Regulation (EU) 2019/942," 13 June 2024. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1787/oj>. [Acesso em 22 Novembro 2024].
- [86] C. CREDITS, "Donald Trump Exits Paris Agreement, Again: What It Means for the U.S. and the World?," 22 January 2025. [Online]. Available: <https://carboncredits.com/donald-trump-exits-paris-agreement-again-what-it-means-for-the-u-s-and-the-world/>. [Acesso em 11 Fevereiro 2025].
- [87] FMC, "First Movers Coalition," FMC, 2023. [Online]. Available: <https://www.weforum.org/first-movers-coalition>. [Acesso em 16 Octuber 2023].
- [88] T. O. I. F. E. Studies, "Guide to Chinese Climate Policy," The Oxford Institute For Energy Studies, 2022. [Online]. Available: <https://chineseclimatepolicy.oxfordenergy.org/book-content/domestic-policies/climate-goals/>. [Acesso em 17 October 2023].
- [89] L. a. al., "Market, policy, and technology requirements for power systems under '30·60' decarbonization goal of China," *Energy for Sustainable Development*, pp. Vol. 70, pages 339-341, October 2022.
- [90] EPE, "Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis 2019," Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2020a.
- [91] CNPE, "Resolução CNPE nº 16, de 29 de outubro de 2018. Dispõe sobre a evolução da adição obrigatória de biodiesel ao óleo diesel vendido ao consumidor final, em qualquer parte do território nacional," Diário Oficial da União, Brasília, 2018b.
- [92] ANP, "Resolução Nº 842, de 14 de maio de 2021. Estabelece a especificação do diesel verde, bem como as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que o comercializem em território nacional," Rio de janeiro, 2021j.
- [93] EPE, "Combustíveis Alternativos para motores do ciclo Diesel," Rio de Janeiro, 2020a.
- [94] ANP, "RenovaBio," Rio de Janeiro, 2021f.
- [95] EIA, U. S. Energy Information Administration, 27 Junho 2024. [Online]. Available: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=62408>. [Acesso em 05 Novembro 2024].
- [96] IMF, "Red Sea Attacks Disrupt Global Trade," International Monetary Fund, 7 March 2024. [Online]. Available: <https://www.imf.org/en/Blogs/Articles/2024/03/07/Red-Sea-Attacks-Disrupt-Global-Trade>. [Acesso em 05 Novembro 2024].

- [97] Eixos, “Brasil se torna um dos cinco maiores mercados de refinarias russas,” 2023 Setembro 2023. [Online]. Available: <https://eixos.com.br/combustiveis-e-bioenergia/brasil-se-torna-um-dos-cinco-maiores-mercados-de-refinarias-russas/>. [Acesso em 4 Novembro 2023].
- [98] IMO, “IMO 2020 – cutting sulphur oxide emissions,” 2020. [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>. [Acesso em 21 Novembro 2024].
- [99] P. d. Itaqui, “Porto do Itaqui avança com cálculo da Pegada de Carbono para iniciar plano para descarbonização,” 30 Outubro 2024. [Online]. Available: <https://www.portodoitaqui.com/imprensa/noticia/porto-do-itaqui-avanca-com-calcudo-da-pegada-de-carbono-para-iniciar-plano-para-descarbonizacao>. [Acesso em 2024 Novembro 7].
- [100] IMO, “International Maritime Organization,” IMO, 2024. [Online]. Available: <https://www.imo.org/>. [Acesso em 15 Fevereiro 2024].
- [101] E. N. P. d. Amador, “Portal do Amador,” Escola Náutica Portal do Amador, 2023. [Online]. Available: <https://www.portaldoamador.com.br/glossario>. [Acesso em 6 Novembro 2023].
- [102] BiodieselBr, “Mistura de diesel com biodiesel pode abastecer navios de forma eficiente, diz estudo,” 8 Fevereiro 2024. [Online]. Available: <https://www.biodieselbr.com/noticias/pesquisa/mistura-de-diesel-com-biodiesel-pode-abastecer-navios-de-forma-eficiente-diz-estudo-080224>. [Acesso em 27 Fevereiro 2024].
- [103] IMO, “IMO 2020 – cutting sulphur oxide emissions,” [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>. [Acesso em 21 Novembro 2024].
- [104] Porto do Itaqui, “Porto do Itaqui,” Porto do Itaqui, 28 Setembro 2023. [Online]. Available: <https://www.portodoitaqui.com/>. [Acesso em 16 Fevereiro 2024].
- [105] P. d. Itaqui, “Porto do Itaqui avança com cálculo da Pegada de Carbono para iniciar plano para descarbonização,” 30 Outubro 2024. [Online]. Available: <https://www.portodoitaqui.com/>. [Acesso em 7 Novembro 2024].
- [106] EPE, “Plano Nacional de Energia,” [Online]. Available: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034>.
- [107] 2. BRASIL, “gov.br,” 2023. [Online]. Available: <https://www.gov.br/cade/pt-br/assuntos/internacional/cooperacao-multilateral/conferencia-das-nacoes->

- unidas-sobre-comercio-e-desenvolvimento-unctad-1. [Acesso em 29 Setembro 2023].
- [108] epbr, “epbr. Combustíveis, Internacional,” epbr, 7 Setembro 2023. [Online]. Available: <https://epbr.com.br/brasil-se-torna-um-dos-cinco-maiores-mercados-de-refinarias-russas/>. [Acesso em 6 Outubro 2023].
- [109] DNV, “Industry Insights. Exploring the potential of biofuels in shipping,” 22 June 2023. [Online]. Available: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Exploring-the-potential-of-biofuels-in-shipping/>.
- [110] Kincaid, “CMM e Wärtsilä fecham acordo para PSVs movidos a etanol,” 20 Agosto 2024. [Online]. Available: <https://www.kincaid.com.br/cmm-e-wartsila-fecham-acordo-para-psvs-movidos-a-etanol/>.

Apêndice A

Regulamentações de países selecionados

A) Regulamentações UE

Ao abrigo da Lei Europeia do Clima, a UE comprometeu-se a reduzir as suas emissões líquidas de gases de efeito de estufa em pelo menos 55% até 2030, em comparação com os níveis de 1990 (pacote Fit for 55). Segundo a Comissão Europeia, o pacote legislativo (The European Green Deal), visa preparar todos os setores da economia da UE a atingir as metas climáticas, de forma justa, econômica e competitiva [81]. Dentro deste pacote ecológico foram atribuídos dois atos legislativos, o EU ETS e o FuelEU Maritime, que definem requisitos para o transporte marítimo. O EU ETS é um sistema de limite e comércio de emissões em que uma quantidade limitada de licenças de emissão (limite máximo) é colocada no mercado e pode ser comercializada. Vale ressaltar, que o limite será reduzido a cada ano, de forma a atingir a meta da EU, de redução das emissões GEE [17]. O FuelEU Maritime é um regulamento que objetiva incrementar a utilização de combustíveis sustentáveis pelos navios com o intuito de reduzir as emissões de gases de efeito estufa deste setor. Este regulamento será aplicado à navios maiores de 5.000 AB, que fazem escala em portos da UE (com exceção de navios de pesca) e exigirá [82]:

- I. redução da intensidade das emissões de gases de efeito estufa da energia utilizada a bordo (conforme Tabela 1).

A partir de 2025, para os navios que operam na UE ou no Espaço Econômico Europeu (EEE), a intensidade média anual de GEE da energia utilizada a bordo, medida como emissões de GEE por unidade de energia (gCO₂e/MJ), tem de estar abaixo do nível exigido. O regulamento marítimo FuelEU também inclui disposições considerando navios com propulsão assistida pelo vento [17] [82].

Tabela 1 - Redução anual média da intensidade carbônica comparativamente à média de 2020 (91,16 gCO₂e/MJ) [17] [82].

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Redução	-2%	-6%	-14,5%	-31%	-62%	-80%

Intensidade de GEE (gCO _{2e} /MJ)	89,3	85,7	77,9	62,9	34,6	18,2
--	------	------	------	------	------	------

- II. conexão com a alimentação elétrica em terra para atender à demanda de energia elétrica quando o navio estiver ancorado no cais (exceto quando utilizarem outras tecnologias nulas em emissões), a partir de 2030 [17] [82].

As emissões de GEE serão calculadas na perspectiva *well-to-wake*, ou seja, incluem as emissões relacionadas à extração, produção, armazenamento, transporte e abastecimento do combustível, além das emissões provenientes da energia utilizada a bordo do navio [17] [21].

Em continuidade à estratégia de redução GEE, entrou em vigor em agosto de 2024, o Regulamento UE/2024/1787, sobre a emissões de metano no setor energético [83]. O Regulamento do Metano abrange os setores de petróleo, gás natural e carvão, impondo uma variedade de obrigações a operadores, empresas e importadores dentro de cada um desses setores, inclusive toda a cadeia de fornecimento de gás natural liquefeito (GNL). Este regulamento contempla as emissões durante as etapas de extração, liquefação, transporte e regaseificação, o que provoca um impacto além das fronteiras da UE, com o potencial de afetar as cadeias de fornecimento globais [84].

O GNL é apontado como uma alternativa relevante para a descarbonização do transporte marítimo, pois reduz significativamente as emissões de dióxido de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado, além de mitigar as emissões de CO₂ [17]. No entanto, ainda que o GNL resulte em menores emissões de CO₂, o vazamento de metano (principal componente do GNL), continua sendo uma preocupação ao longo da cadeia de valor do gás natural liquefeito. Embora o metano tenha um tempo médio de residência atmosférica menor que o do CO₂, de 10 a 12 anos em comparação a centenas de anos, seu efeito estufa em um período de 20 anos é 82,5 vezes mais potente do que o do CO₂. Também apresenta um potencial de aquecimento global 29,8 vezes maior do que o do CO₂ em uma escala de tempo de 100 anos [85].

B) Regulamentações nos EUA

Os Estados Unidos são o segundo maior emissor de carbono do mundo, responsável por 15% das emissões globais, atrás apenas da China. O país desempenhou um papel fundamental na formação do Acordo de Paris (2015), sob a presidência de Barack Obama, comprometendo-se em reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 26-28%, abaixo dos níveis de 2005 (até 2025), por meio de políticas como o Clean Power Plan e investimentos federais em energia limpa. Todavia, ao assumir a presidência

dos EUA, em 2017, Donald Trump, interrompe a trajetória ao retirar o país do Acordo de Paris, justificando, preocupações econômicas [86].

Em 2021, os EUA retomaram a adesão ao Acordo de Paris, comprometendo-se em reduzir as emissões líquidas dos GEE, em 50%, até 2030 e atingir emissões líquidas zero até 2050, ancorados principalmente por investimentos em energia renovável, redução de emissões de metano e na captura de carbono, entre outras ações [17].

No âmbito do transporte marítimo, destaca-se a iniciativa *First Movers Coalition (FMC)*³⁸, lançada em 2021, em parceria com o Departamento de Estado, dos EUA e o Fórum Econômico Mundial, especificamente na COP26 (Escócia, nov./2021). A FMC tem como membros as maiores empresas globais do mundo (com grande poder de compra), que estabeleceram compromissos de uso de combustíveis de emissão zero até 2030, de maneira que possam ser criados mercados iniciais que apoiem as tecnologias mais relevantes, necessárias para alcançar emissões líquidas zero, até 2050. Para as transportadoras, foi acordado que, até 2030, pelo menos 5% do transporte marítimo em alto mar será realizado por navios capazes de se movimentarem com combustíveis de emissão zero. Já para os proprietários das cargas, o compromisso assumido para 2030, é que pelo menos 10% das mercadorias transportadas internacionalmente sejam movimentadas por navios movidos com combustíveis de emissão zero, com perspectiva de abranger 100% das mercadorias³⁹, até 2040 [87]. De acordo com a DNV [17], em 2022, os EUA adotaram uma importante política pública, a IRA (Inflation Reduction Act), que destina investimentos vultosos para apoiar estratégias de longo prazo, com foco na segurança energética, redução de emissão de GEE e inovação energética, entre outras frentes, bem como o fornecimento de créditos fiscais para apoiar as tecnologias de produção de hidrogênio e captura e utilização de carbono. O setor marítimo também receberá investimentos, voltados para melhorar as instalações portuárias, por meio do Programa de Desenvolvimento de Infraestruturas Portuárias (PIDP).

Apesar do progresso, novamente ocorre o anúncio da saída dos EUA do Acordo de Paris e com a postura pró-combustíveis fósseis do presidente Donald Trump, que

³⁸ A FMC é uma coligação de empresas que utilizam o seu poder de compra para criar mercados iniciais para tecnologias zero emissoras inovadoras em setores de difícil abatimento das emissões (alumínio, cimento, aço, transporte marítimo, transporte aéreo etc.). Estes setores abrangidos são responsáveis por 30% das emissões globais – uma proporção que deverá aumentar para mais de 50% até meados do século, sem progressos urgentes na inovação em tecnologias “limpas”. Os membros da FMC devem comprometer-se a usar combustíveis com emissão zero em embarcações recém-construídas e modernizadas. Os combustíveis incluídos no escopo incluem: (i) combustíveis com zero emissões de gases de efeito estufa com base no ciclo de vida; (ii) combustíveis que sejam suficientemente escalonáveis para descarbonizar toda a indústria naval quando misturados ou usados de forma independente; (iii) combustíveis para os quais foram abordadas preocupações de utilização do solo/sustentabilidade; (iv) combustíveis que possam ser utilizados com segurança e antecipadamente através de formação e normas adequadas. Estes compromissos não incluem GNL, combustíveis *drop-in* e compensações de carbono [87].

³⁹O compromisso voluntário assumido pelos membros é dependente da disponibilidade da tecnologia bem como do aceite de que a tecnologia poderá ter um custo superior.

ameaça reverter os avanços conquistados, trazendo dúvidas e preocupações sobre os impactos ambientais e econômicos que podem advir, especialmente antes das negociações climáticas da COP30, que ocorrerá no Brasil, onde se espera que as nações revisem e reforcem seus compromissos com o Acordo de Paris [86].

C) Regulamentações China

O governo chinês anunciou em 2021, dois grandes objetivos climáticos: (i) atingir o pico das emissões de dióxido de carbono (CO₂) antes de 2030 e (ii) alcançar a neutralidade de carbono antes de 2060 (Objetivos “30-60”). Além desses dois objetivos, o governo chinês destacou quatro outros objetivos principais relativos às mudanças climáticas, todos a serem alcançados até 2030 [88].

São eles:

- Reduzir as emissões de CO₂ por unidade de PIB em mais de 65%, em relação ao nível de 2005⁴⁰;
- Aumentar a participação dos combustíveis renováveis no consumo de energia primária para cerca de 25%⁴¹;
- Aumentar o volume do estoque florestal em 6 bilhões de metros cúbicos em relação ao nível de 2005⁴²;
- Elevar a capacidade total instalada de energia eólica e solar para mais de 1.200 GW⁴³.

Segundo Liu *et al.* (2023), o setor energético da China pretende transformar os seus padrões de desenvolvimento para ajudar toda a sociedade a atingir os Objetivos “30-60”. Durante a transformação, a penetração da energia de baixo carbono aumentaria enormemente, o que causaria um duplo desafio no que diz respeito ao funcionamento econômico e seguro, dos sistemas de energia [89].

No âmbito do transporte marítimo, conforme DNV, o governo chinês está comprometido em avançar na modernização de navios antigos, desenvolver embarcações movidas a eletricidade e a GNL, promover a utilização de energia elétrica (em terra) para navios que se encontram no porto e avançar na demonstração e utilização de navios ecológicos e inteligentes ao longo da costa e das vias navegáveis interiores, de acordo com as condições locais. No contexto do 14º Plano Quinquenal da China (2021-2025), o Ministério dos Transportes, publicou em 2022, o Plano Desenvolvimento para o Transporte Verde e o Plano para Transporte

⁴⁰Em 2020, as emissões de CO₂ por unidade de PIB, diminuíram 48%, em relação ao nível de 2005.

⁴¹Em 2020, a participação de combustíveis renováveis no consumo de energia primária foi da ordem de 16%.

⁴²Em 31 de dezembro de 2020, o volume do estoque florestal foi de 4,5 bilhões de metros cúbicos acima do nível de 2005.

⁴³Em 31 de dezembro de 2020, a capacidade total instalada de energia eólica e solar foi de 635 GW.

Marítimo, que incentivam o uso de energia menos emissora, incluindo, por exemplo, GNL, metanol, hidrogênio, amônia, entre outros, bem como o aumento do uso de energia em terra. Desde 2022, todo navio acima de 400 AB que se movimente nos portos chineses (independente de bandeira), deverá enviar à Administração de Segurança Marítima da China (MSA), os dados de consumo de energia de sua última viagem (conforme regulamento sobre dados de consumo de energia e Intensidade de Carbono) [17].

Apêndice B

Encomendas de embarcações movidas a combustíveis alternativos

Em um contexto de incentivo crescente para redução das emissões de gases de efeito estufa, e diversas incertezas em torno da disponibilidade de combustíveis de baixa emissão, muitos armadores começaram a construir ou modernizar suas frotas com a inclusão de embarcações bicombustíveis (tais como navios que podem funcionar com óleo diesel e metanol), a metanol ou amônia [68].

Grandes empresas do transporte marítimo mundial como a Maersk, CMA CGM, Cosco, Cargill, entre outras, já anunciaram encomendas de navios abastecidos por combustíveis alternativos, como metanol e amônia, conforme pode ser visto na Figura 41

Naftomar Places \$500 Million Order for Large Ammonia Carriers from Hanwha



Hanwha Global received one of the first large orders to build ammonia carriers (Photo: Ocean90 photo)

PUBLISHED NOV 14, 2023 5:32 PM BY THE MARITIME EXECUTIVE

Evergreen Orders 24 Methanol-Fueled Ships at a Cost of Nearly \$5 Billion



Evergreen will spend up to \$5 billion for a new class of methanol dual-fuel ships (Evergreen)

PUBLISHED JUL 11, 2022 2:58 PM BY THE MARITIME EXECUTIVE

Indústria já tem mais de 100 encomendas de navios a metanol verde



25 são da transportadora dinamarquesa Maersk, que encomendou seis porta-contêineres de médio porte bi-combustíveis esta semana

Voggen - Maersk anuncia 10 novas encomendas de navios a metanol verde para 2023 (Foto: Maersk)

COSCO Orders 12 Ultra-Large, Green Methanol Containerships for \$2.9B



COSCO will invest \$2.9 billion for methanol dual-fuel ultra-large containership (COSCO)

PUBLISHED OCT 26, 2022 4:17 PM BY THE MARITIME EXECUTIVE

Cargill and Lauritzen Order Another Pioneering Methanol-Fueled Bulker



Lauritzen ordered a third methanol-fueled bulker to operate for Cargill (Lauritzen)

PUBLISHED JUN 20, 2023 6:45 PM BY THE MARITIME EXECUTIVE

Exmar set to equip ordered vessels with ammonia

The two vessels, which are currently on order at the Hyundai Mipo Dockyard, are set to be delivered by 2026.

Car Vines - October 16, 2022



Exmar claims to have one of the most modern medium-LNG fleets in the world. Credit: Exmar/TTI Shutterstock

MSC Confirms Order for Hydrogen Cruise Ship Pair

September 21, 2022



The total investment in six luxury ships for Explora Journeys is worth \$3.8B

MSC Cruises and Cruise Worldwide confirm the order of two new cruise ships to have a total Explora Journeys fleet.

MSC Cruises and Cruise Worldwide confirm their commitment to achieving zero carbon emissions by 2050.

The contracts are conditional on obtaining financing for the shipyards.



Maersk orders world's biggest ammonia carriers from Hyundai to ship hydrogen derivative across oceans

The first four vessels will be delivered from late 2026, with an option for an extra six carriers

1 December 2022 10:00 AM | UPDATED 1 December 2022 10:00 AM

Figura 41 - Anúncios de encomendas de novos navios a combustível alternativo, por grandes empresas do transporte marítimo

No Brasil, a empresa Vale, está desenvolvendo um projeto pioneiro de *design*, em parceria com as empresas norueguesas Brevik Engineering AS e Passer Marine, para a incorporação de tanques multicombustíveis em navios minerais. Em 2022, a empresa obteve a aprovação da Sociedade Classificadora DNV (Approval in Principle - AIP), que validou a viabilidade técnica e indicou que o projeto pode ser desenvolvido para os navios fretados pela mineradora, que poderão ser adaptados para, no futuro, armazenarem combustíveis alternativos como gás natural liquefeito (GNL), metanol e amônia. A Vale ressalta que o sistema de tanque multicombustível possibilita a adoção de combustíveis alternativos e favorece o aproveitamento dos navios existentes, muitos deles com mais de 20 anos de vida útil pela frente. Este projeto, aliado a outras tecnologias de eficiência energética em andamento na Vale, como as velas rotativas e a lubrificação a ar, proporcionarão navios mais eficientes e com emissões de carbono reduzidas [38].



Empresa de Pesquisa Energética

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

