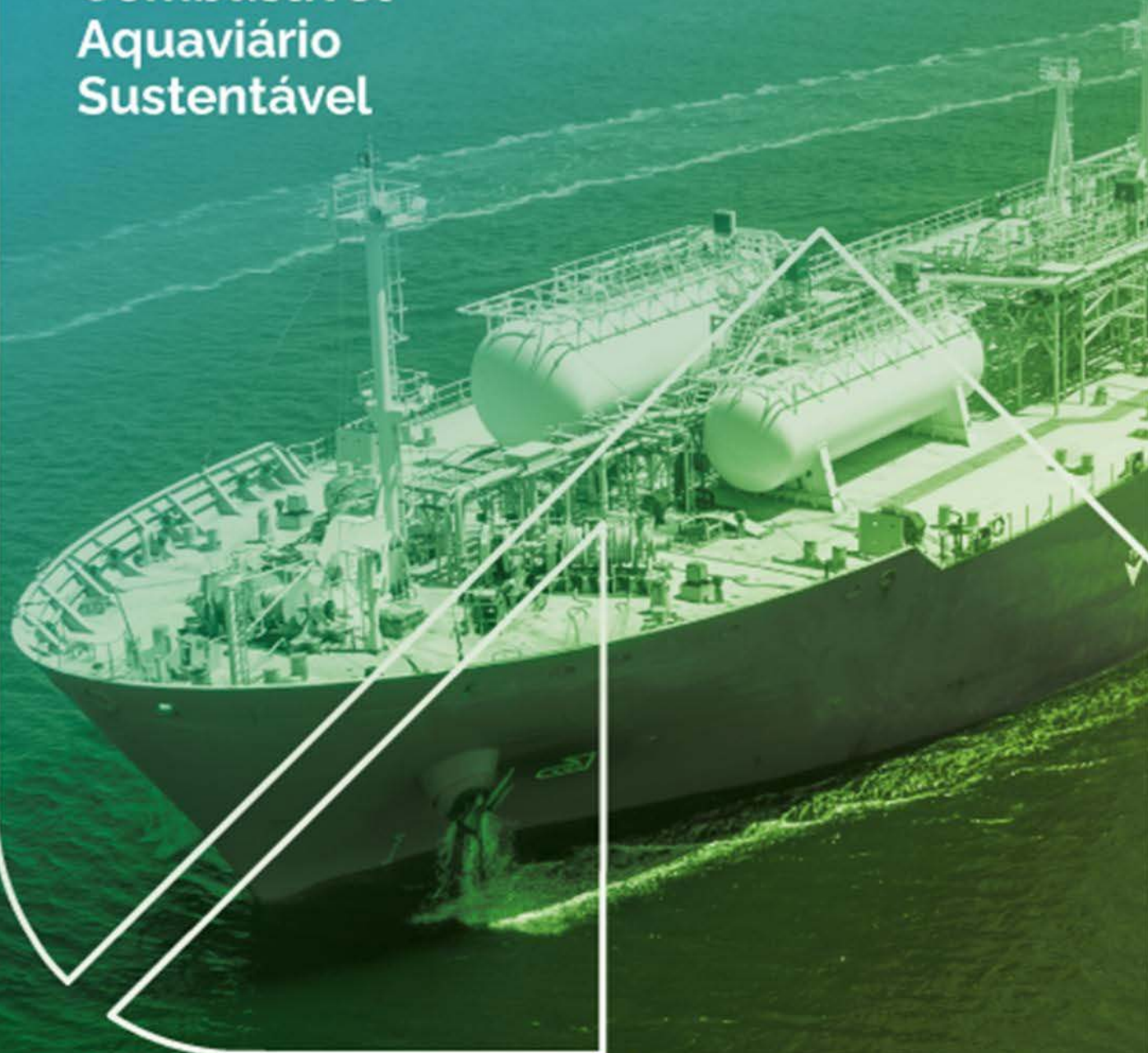


Relatório do Grupo de Trabalho da Resolução CNPE 10/2024

**Combustível
Aquaviário
Sustentável**



Ministério de Minas e Energia

Ministro de Estado
Alexandre Silveira

Secretário Executivo
Arthur Cerqueira Valerio

Secretário Nacional de Petróleo, Gás Natural Biocombustíveis
Renato Cabral Dias Dutra

Ministério de Minas e Energia-MIME
Esplanada dos Ministérios -Bloco 'U-8° andar
70.065-900 – Brasília

MARÇO/2026

Representantes do GT

Ministério de Minas e Energia

Aldo Barroso Cores Júnior
Danielle Lanchares Ornelas
Deivson Matos Timbó
Edie Andreeto Junior
(Coordenador suplente do GT)
Karla Nayra Gonçalves Ribeiro
Maríthiza Gonçalves Vieira
Marlon Arraes Jardim Leal
(Coordenador do GT)
Renato Cabral Dias Dutra
(Coordenador do GT no período
de ago/2024 a set/2025)
Rodrigo Mendonça de Lima
Ronny José Peixoto

Casa Civil da Presidência da República

Euler Martins Lage
Jaqueline Meneghel Rodrigues
Karla Branquinho dos Santos

Ministério da Fazenda

Magno Antônio Calil Resende Silveira
Renato Lima Figueiredo Sampaio

Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços

Eliezer de Lima Lopes
Luciana Machado Rodrigues

Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES

André Pompeo do A. Mendes
Ricardo Cunha

Conselho Administrativo de Defesa Econômica – Cade

Vinícius Luciano Toledo dos Santos

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP

Fábio da Silva Vinhado
Jackson da Silva Albuquerque
Joana Borges da Rosa

Empresa de Pesquisa Energética – EPE

Arthur Cortez Pires de Campos
Danielle Borher de Andrade
Marina Damião Besteti Ribeiro
Patrícia F. B. Stelling
Vitor Manuel do Espírito S. Silva

Ministério de Portos e Aeroportos

Bruna Roncel de Oliveira
Eduardo Pereira
Marina Cavalini
Tatiana Gontijo
Vitor Brasil

Ministério das Relações Exteriores

Carolina Hippolito von der Weid
Helena Gressler
Sergio Hablitschek

Autoridade Marítima Brasileira

Alessander Felipe Imamura Carneiro
Flávio Haruo Mathuiy

Agência Nacional de Transportes Aquaviários – Antaq

Alessandro Max Barros Bearzi

Sumário

1. SUMÁRIO EXECUTIVO	7
2. INTRODUÇÃO	10
2.1 Contextualização	10
2.2 Escopo	11
3. METODOLOGIA.....	12
3.1 Das perguntas de pesquisa	12
3.2 Da consulta aos postos diplomáticos	14
3.3 Da participação social	16
3.4 Dos Estudos Prévios	20
4. ANÁLISES E DISCUSSÕES	34
4.1 Descarbonização do Transporte Aquaviário	34
4.1.1 Panorama do transporte aquaviário no Brasil.....	34
4.1.2 Combustíveis Marítimos Convencionais e Infraestrutura de Abastecimento no Brasil.....	38
4.1.3 Combustíveis Marítimos Alternativos.....	43
4.1.3.1 Contexto Atual.....	43
4.1.3.2 Gás Liquefeito Petróleo- GLP	48
4.1.3.3 Metanol	49
4.1.3.4 Hidrogênio.....	49
4.1.3.5 Eletrocombustíveis (em inglês, e-fuels)	50
4.1.3.6 Biocombustíveis	50
4.1.3.7 Amônia	54
4.1.4 Desafios aos Combustíveis Alternativos.....	54
4.1.5 Outras Iniciativas de Descarbonização do Transporte Marítimo	60
4.1.5.1 Corredores Marítimos Verdes	60
4.1.5.2 Frentes e Iniciativas Privadas	64
4.1.5.3 Eficiência Operacional	65
4.1.5.4 Atuação dos Portos na Descarbonização do Transporte Aquaviário .	67
4.1.6 Trajetórias para o Transporte Aquaviário Brasileiro.....	71
4.1.6.1 Metodologia.....	72
4.1.6.2 Trajetória 1 - Base.....	74
4.1.6.3 Trajetória 2 – Sem Combustíveis Fósseis em 2050	75

4.1.6.4 Trajetória 3 – Sem Combustíveis Fósseis em 2050 – Priorizando Metanol	76
4.1.6.5 Trajetória 4 – Sem Combustíveis Fósseis em 2050 – Priorizando Biocombustíveis	78
4.2 Da consulta aos postos diplomáticos	83
4.2.1 Qual posição do país nos debates na Organização Marítima Internacional (IMO), quanto aos mecanismos técnicos para mensuração da descarbonização?	83
4.2.2 O país possui políticas públicas voltadas para os combustíveis sustentáveis de navegação e/ou para redução de emissões no setor aquaviário?	84
4.2.3 Como funciona a regulamentação dos combustíveis sustentáveis de navegação dos países? Há regulação e/ou normatização para esses combustíveis visando ao uso marítimo?	85
4.2.4 Como funciona a logística de abastecimento do mercado de combustíveis sustentáveis de navegação no país, se aplicável? Quais os principais combustíveis sustentáveis de navegação utilizados?	87
4.2.5 Existe alguma iniciativa do país voltada para o estabelecimento de Corredores Marítimos Verdes/Sustentáveis?	90
4.2.6 Quais incentivos (tributários e de financiamento de projetos produtivos e de PDI) disponíveis para atrair investimentos privados em combustíveis aquaviários sustentáveis?	91
4.2.7 Para o conjunto de combustíveis sustentáveis com potencial de utilização no mercado de combustíveis aquaviários, quais adaptações relevantes de infraestrutura portuária de armazenamento e movimentação?	93
4.2.8 Existem políticas de incentivo à infraestrutura portuária para movimentação, armazenamento e abastecimento de combustíveis sustentáveis de navegação nos terminais portuários?	95
4.3 Panorama da participação social	99
4.3.1 Desafios Econômicos, Financeiros e Regulatórios da Transição Energética no Transporte Aquaviário	100
4.3.2 Infraestrutura Portuária e Logística como vetores críticos da transição energética	105

4.3.3 Arranjos institucionais e políticas públicas como resposta aos desafios da descarbonização marítima.....	112
4.4 Síntese das Posições Brasileira no debate internacional.....	116
4.4.1 Mudança Indireta no Uso da Terra (ILUC).....	116
4.4.2 Avaliação de Ciclo de Vida e Valores Padrão (LCA Guidelines)	117
4.4.3 Combustíveis de Emissões Zero ou Quase Zero (ZNZ Fuels)	119
4.4.4 Emissões Fugitivas de Metano (Methane Slip).....	120
4.4.5 Etanol como Combustível Marítimo	121
4.4.6 Certificação de Combustíveis Marítimos	122
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	124
5.1 Das conclusões	124
5.2 Das recomendações.....	125
6. BIBLIOGRAFIA.....	130

1. SUMÁRIO EXECUTIVO

O Subgrupo de Trabalho nº 05 (SubGT-05), instituído pela Resolução CNPE nº 10/2024 e coordenado pelo Ministério de Minas e Energia, teve como objetivo formular diretrizes para o desenvolvimento do mercado de combustíveis aquaviários sustentáveis no Brasil, com foco na redução das emissões do transporte marítimo em alinhamento às metas da Organização Marítima Internacional (IMO). Os trabalhos contaram com ampla participação de órgãos governamentais federais, entidades reguladoras, empresas, associações setoriais, academia e organizações da sociedade civil, além de consultas internacionais conduzidas por meio da rede diplomática brasileira.

O escopo do SubGT-05 foi estruturado em quatro eixos principais: (i) análise de experiências internacionais em políticas públicas, regulação, mercados de combustíveis sustentáveis, corredores verdes e negociações no âmbito da IMO; (ii) avaliação da viabilidade de inclusão dos combustíveis aquaviários sustentáveis no RenovaBio, considerando impactos econômicos, desafios regulatórios e eventuais ajustes legais; (iii) exame da escalabilidade da produção nacional de biocombustíveis e outros combustíveis de baixo carbono, incluindo competitividade, incentivos, desenvolvimento de mercado e cenários de demanda; e (iv) identificação das adaptações necessárias na infraestrutura portuária e logística de navegação, bem como diretrizes regulatórias para viabilizar investimentos privados, eletrificação portuária e uso de modais mais eficientes energeticamente, com destaque para a cabotagem. Ao todo, foram realizadas 24 reuniões técnicas e consultas a 20 países com relevância na agenda de descarbonização marítima.

As contribuições internacionais revelaram um cenário heterogêneo, porém convergente, de esforços para a descarbonização do transporte marítimo, com maior avanço na Europa e na Ásia. Observa-se apoio generalizado às diretrizes da IMO, especialmente à adoção de métricas de emissões baseadas em Avaliação do Ciclo de Vida (well-to-wake), ainda que com diferentes níveis de ambição, capacidade institucional e preocupações relacionadas à transição justa. No curto prazo, os biocombustíveis líquidos sustentáveis se consolidam internacionalmente como a principal solução disponível, enquanto combustíveis como hidrogênio e amônia permanecem em estágios iniciais de implantação. Corredores marítimos verdes, incentivos financeiros e tributários, mecanismos de certificação e investimentos

graduais em infraestrutura portuária emergem como instrumentos centrais dessa transição.

No contexto brasileiro, o debate sobre a adoção de combustíveis aquaviários sustentáveis evidencia desafios econômicos, regulatórios, logísticos e tecnológicos, como o custo relativo dos combustíveis de baixo carbono, a necessidade de preservar a competitividade da cabotagem e das exportações, as limitações da infraestrutura portuária e a harmonização entre políticas nacionais e critérios internacionais. Em paralelo, o país vem avançando de forma consistente por meio de iniciativas governamentais, empresariais e científicas, incluindo ajustes regulatórios, instrumentos de financiamento público, planejamento setorial e testes operacionais com biocombustíveis e soluções de eletrificação portuária.

Com base nas análises realizadas, o relatório conclui que o Brasil reúne condições objetivas para assumir papel de destaque na descarbonização do transporte marítimo internacional. No curto e médio prazos, os biocombustíveis líquidos— configuram uma alternativa promissora para a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE), em cumprimento das metas da IMO, especialmente por meio da utilização de combustíveis compatíveis com a infraestrutura e com a frota existente (drop-in). Nesse contexto, destacam-se, no horizonte imediato, as misturas de biodiesel ao bunker fóssil, já tecnicamente viáveis e com experiências operacionais em curso no Brasil e em hubs internacionais de abastecimento marítimo, como Singapura e Roterdã. Outras rotas tecnológicas, como o óleo vegetal hidrotratado (HVO) e o etanol, apresentam elevado potencial de descarbonização, mas ainda demandam avanços adicionais para sua consolidação no transporte marítimo. No caso do etanol, embora o país possua produção em larga escala e experiência logística consolidada, o desenvolvimento e a validação de motores marítimos compatíveis ainda se encontram em estágio inicial. Quanto ao HVO, apesar de suas características favoráveis como combustível drop-in, a produção nacional ainda é incipiente, o que limita sua disponibilidade no curto prazo. O SubGT-05 destaca, contudo, que a consolidação desse protagonismo exige ações coordenadas para superar entraves estruturais, incluindo a adequação da infraestrutura portuária, a harmonização do RenovaBio com as metodologias de Análise de Ciclo de Vida adotadas pela IMO, a redução de custos dos combustíveis sustentáveis e o fortalecimento de políticas que incentivem modais mais eficientes energeticamente, como a cabotagem. Nesse sentido, o relatório

sistematiza recomendações ao CNPE organizadas em sete pilares — mandato, metas de descarbonização e alinhamento à IMO, financiamento e PD&I, tributação, qualidade e certificação, governança, infraestrutura e logística — visando criar um ambiente regulatório previsível, estimular investimentos privados e posicionar o Brasil não apenas como fornecedor de biocombustíveis, mas como hub global de combustíveis renováveis de próxima geração, alinhado às metas de neutralidade climática da navegação internacional.

2. INTRODUÇÃO

2.1 Contextualização

O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), por meio da Resolução CNPE nº 10, de 26 de agosto de 2024, instituiu um Grupo de Trabalho destinado a subsidiar a formulação de medidas e diretrizes voltadas ao desenvolvimento do mercado nacional de combustíveis aquaviários, combustíveis de aviação e gás liquefeito de petróleo.

O Grupo de Trabalho é coordenado pelo Ministério de Minas e Energia, e envolve a participação de representantes da Casa Civil da Presidência da República; do Ministério da Fazenda; do Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços; do Ministério da Agricultura e Pecuária; do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação; do Ministério dos Transportes; do Ministério de Portos e Aeroportos; do Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima; do Ministério das Relações Exteriores; da Autoridade Marítima Brasileira; da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP; da Agência Nacional de Aviação Civil - Anac; da Agência Nacional de Transportes Aquaviários - Antaq; do Conselho Administrativo de Defesa Econômica - Cade; da Empresa de Pesquisa Energética - EPE; e do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES.

Os representantes titulares e suplentes foram designados por intermédio da Portaria de Pessoal GM/MME nº 267, de 30 de dezembro de 2024, publicada no Diário Oficial da União em 2 de janeiro de 2025.

O referido grupo de trabalho deliberou pela divisão em cinco subgrupos:

- SubGT 01, voltado para o mercado de gás liquefeito de petróleo (GLP);
- SubGT 02, voltado para o mercado de combustíveis fósseis de aviação;
- SubGT 03, voltado para o mercado de combustíveis de aviação sustentáveis;
- SubGT 04, voltado para o mercado de combustíveis fósseis aquaviários; e
- SubGT 05, voltado para o mercado de combustíveis aquaviários sustentáveis.

O presente estudo refere-se ao subgrupo de trabalho 5 (SubGT 05), portanto, ao mercado de combustíveis aquaviários sustentáveis.

2.2 Escopo

Tendo em vista que o presente estudo se refere ao mercado de combustíveis aquaviários sustentáveis, o Grupo de Trabalho estabeleceu como escopo, os incisos I, II e VI do § 1º do art. 1º da Resolução CNPE nº 10/2024, conforme destacado em negrito:

Art. 1º Fica instituído Grupo de Trabalho - GT com a finalidade de elaborar estudos para subsidiar o Conselho Nacional de Política Energética - CNPE na proposição de medidas e diretrizes voltadas para o mercado nacional de:

I - Combustíveis aquaviários, incluindo o óleo combustível marítimo e o óleo diesel marítimo;

II - Combustíveis de aviação, incluindo o querosene de aviação - QAV e o combustível sustentável de aviação - SAF; e

III - gás liquefeito de petróleo - GLP, incluindo GLP Renovável - BioGLP.

§ 1º O estudo referente ao mercado de combustíveis aquaviários deverá contemplar, no mínimo, os seguintes temas:

I - Experiências internacionais de políticas públicas voltadas ao combustível aquaviário;

II - Modelos de precificação dos combustíveis aquaviários, incluindo as experiências internacionais;

III - inclusão do combustível aquaviário sustentável na Política Nacional de Biocombustíveis - RenovaBio;

IV - Escalabilidade da produção nacional de biocombustíveis, e demais combustíveis de baixo carbono para eventual demanda do transporte aquaviário;

V - Adaptações da infraestrutura portuária necessárias para a implementação dos biocombustíveis e demais combustíveis de baixo carbono no mercado de combustíveis aquaviários; e

VI - Ações e medidas para a promoção da concorrência e atração de investimentos no mercado de combustíveis aquaviários, considerando as experiências internacionais.

3. METODOLOGIA

3.1 Das perguntas de pesquisa

A formulação das perguntas de pesquisa relacionadas os incisos I, III, IV e V do § 1º do art. 1º da Resolução CNPE nº 10/2024 têm como objetivo contribuir para delinear os trabalhos do SubGT-05.

O SubGT-05 formulou perguntas de pesquisa, que foram aprovadas no âmbito do Grupo de Trabalho deliberativo pelos representantes indicados pela Portaria de Pessoal GM/MME nº 267/2024. Tais perguntas serão destinadas aos diversos órgãos e entidades públicas e privadas relacionadas ao setor marítimo para prestação de assessoramento, permitindo a participação social.

A seguir, estão listadas as perguntas de pesquisa:

Sobre o inciso I - “Experiências internacionais de políticas públicas voltadas aos combustíveis sustentáveis de navegação”

1. Quais países ou blocos regionais possuem políticas públicas voltadas para os combustíveis aquaviários sustentáveis e quais suas características? Em quais pontos essas políticas representam oportunidade/risco/ameaça ao mercado brasileiro de combustíveis aquaviários sustentáveis?

2. Como funciona a regulação dos combustíveis aquaviários sustentáveis dos países selecionados? Há regulação/normatização para os combustíveis alternativos (etanol, metanol, GNL, amônia, hidrogênio, biodiesel, HVO, etc)? Existem mandatos para uso e/ou adição de combustíveis sustentáveis ou mandatos de descarbonização estabelecidos?

3. Como funciona o mercado de combustíveis aquaviários nestes países? Qual a produção de combustíveis aquaviários sustentáveis nos últimos anos? Quais os principais produtores? O país é importador ou exportador? Quais os principais mercados atendidos?

4. Existe algum projeto de Corredores verdes sustentáveis (internacional)?

5. Qual o estado da arte dos debates no âmbito da IMO, por grupo de temas afetos ao combustível aquaviário sustentável? Quais os principais pontos da estratégia brasileira por tema? Quais as divergências e resistências enfrentadas nas discussões?

Sobre o inciso III - “Inclusão do combustível aquaviário sustentável no “RenovaBio”

1. Quais os principais biocombustíveis e demais combustíveis de baixo carbono apresentam potencial de utilização no mercado de combustíveis aquaviários?
2. Quais os aspectos positivos e negativos de inclusão dos combustíveis aquaviários sustentáveis no RenovaBio?
3. Existem propostas legislativas em curso sobre o assunto? Quais adaptações legislativas e/ou regulatórias seriam necessárias para incorporar tais combustíveis aquaviários sustentáveis no RenovaBio?
4. Quais diretrizes políticas públicas que poderiam contribuir para a inclusão do combustível aquaviário sustentável no RenovaBio?

Sobre o inciso IV: “Escalabilidade da produção nacional de biocombustíveis e outros combustíveis sustentáveis para eventual demanda do transporte marítimo.”

1. Existem medidas para garantir que a transição para combustíveis sustentáveis no bunker marítimo não resulte em aumentos significativos de custos, que possam impactar a competitividade do transporte marítimo global?
2. sustentáveis e tecnologias de descarbonização no setor marítimo? Há oportunidades para (re)desenho de incentivos?
3. Quais os principais combustíveis aquaviários sustentáveis que apresentam potencial de utilização no mercado brasileiro e para suprimento no mercado internacional?
4. Como é desenvolvido o mercado destes combustíveis no Brasil? Quais os principais produtores, consumidores (mercado interno e externo), volumes comercializados, fluxos logísticos, oportunidades de melhorias?
5. Elaboração de cenários de demanda destes combustíveis de forma a avaliar a oferta disponível e as necessidades de expansão da produção destes combustíveis, bem como das matérias-primas.

Sobre o inciso V “Adaptações da infraestrutura portuária necessárias para a implementação dos biocombustíveis e demais combustíveis de baixo carbono no mercado de combustíveis aquaviários”

1. No Brasil, quais os principais para o mercado de combustíveis aquaviários?

2. Quais os principais biocombustíveis e demais combustíveis de baixo carbono apresentam potencial de utilização no mercado de combustíveis aquaviários?

3. Para o conjunto elencado de combustíveis sustentáveis, quais adaptações relevantes de infraestrutura portuária seriam necessárias?

4. Quais adaptações legislativas e regulatórias, bem como diretrizes de políticas públicas poderiam contribuir para atração de investimentos para projetos de adaptações da infraestrutura portuária necessárias para a implementação dos biocombustíveis e demais combustíveis de baixo carbono no mercado de combustíveis aquaviários?

5. Existem políticas de incentivo à infraestrutura portuária para movimentação, estocagem e abastecimento de combustíveis aquaviários sustentáveis? E para a eletrificação – *onshore power supply (OPS)*?

3.2 Da consulta aos postos diplomáticos

Com o objetivo de ampliar o conhecimento sobre combustíveis sustentáveis para a navegação, foi realizada uma consulta junto a postos diplomáticos no exterior, conforme mostrado no Quadro 1.

A seleção dos países a serem consultados baseou-se em sua relevância no contexto global e regional.

Quadro 1. Países cujos postos diplomáticos foram consultados

Continente	País
África	Nigéria
	África do Sul
Europa	Grécia
	Alemanha
	Eslováquia
	Hungria
	Suécia
	Letônia
	Finlândia
	Portugal
	Eslovênia
	Reino Unido
	Noruega
	Croácia
Ásia	Índia
	China
	Coreia do Sul
	Singapura
Japão	
América do Norte	Estados Unidos

Para orientar a consulta e facilitar inclusive a comparação entre os países, foram elaboradas 8 perguntas:

1. Qual posição do país nos debates na Organização Marítima Internacional (IMO), quanto aos mecanismos técnicos para mensuração da descarbonização.

2. O país possui políticas públicas voltadas para os combustíveis sustentáveis de navegação e/ou para redução de emissões no setor aquaviário?

3. Como funciona a regulamentação dos combustíveis sustentáveis de navegação dos países? Há regulação e/ou normatização para esses combustíveis visando ao uso marítimo?

4. Como funciona a logística de abastecimento do mercado de combustíveis sustentáveis de navegação no país, se aplicável? Quais os principais combustíveis sustentáveis de navegação utilizados?

5. Existe alguma iniciativa do país voltada para o estabelecimento de Corredores Marítimos Verdes/Sustentáveis?

6. Quais incentivos (tributários e de financiamento de projetos produtivos e de PDI) disponíveis para atrair investimentos privados em combustíveis aquaviários sustentáveis

7. Para o conjunto de combustíveis sustentáveis com potencial de utilização no mercado de combustíveis aquaviários, quais adaptações relevantes de infraestrutura portuária de armazenamento e movimentação.

8. Existem políticas de incentivo à infraestrutura portuária para movimentação, armazenamento e abastecimento de combustíveis sustentáveis de navegação nos terminais portuários?

3.3 Da participação social

O Grupo de Trabalho, composto pelos representantes indicados pela Portaria de Pessoal GM/MME nº 267/2024, definiu que a participação social ocorreria no âmbito dos subgrupos. Nesse sentido, ficou estabelecido para o SubGT-05 que a participação social ocorreria por meio de reuniões bilaterais, entre subgrupo e agentes, de cerca de 45 minutos. Adicionalmente, o subgrupo recepcionaria documentos.

O subgrupo selecionou agentes econômicos e entidades representativas, organizados por segmentos setoriais. Foram contemplados o segmento de Produção de Combustíveis, o segmento de Infraestrutura Portuária, o segmento de Logística de Navegação, o segmento de Fabricantes de Motores e de Embarcações, além da Academia, dos think tanks, das agências de mercado e da sociedade civil em geral. A lista a seguir abrange as entidades participantes.

Agroicone (Agroicone)

Amaggi (Amaggi)

Argus (Argus)

Associação Brasileira da Indústria do Hidrogênio Verde (ABIHV)

Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (Abiove)

Associação Brasileira de Armadores de Cabotagem (Abac)
Associação Brasileira de Bunker (Abrabunker)
Associação Brasileira de Cruzeiros Marítimos (Clia Brasil)
Associação Brasileira de Entidades Portuárias e Hidroviárias (Abeph)
Associação Brasileira de Terminais de Líquidos (ABTL)
Associação Brasileira de Terminais Portuários (ABTP)
Associação Brasileira para o Desenvolvimento da Navegação Interior (Abani)
Associação de Terminais Portuários Privados (ATP)
Associação de Empresas de Apoio Marítimo (ABEAM)
Caterpillar
CENERGIA COPPE/UFRJ (CENERGIA COPPE/UFRJ)
Centro Brasileiro de Relações Internacionais (Cebri)
Centro de Navegação Transatlântico (Centronave)
CMA-CGM (CMA-CGM)
Complexo do Pecém (Complexo do Pecém)
DNV (DNV)
Everllence (Everllence)
Federação Nacional das Operações Portuárias (Fenop)
Financiadora de Estudos e Projetos (Finep)
FS Bioenergia (FS Bioenergia)
Inpasa (Inpasa)
Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP)
International Council on Clean Transportation (ICCT)
Leggio Consultoria (Leggio Consultoria)
Maersk (Maersk)
MSC Group (MSC Group)
Petrobras (Petrobras)
Porto do Açú (Porto do Açú)
Raízen (Raízen)
S&P Global Platts
SAE Brasil (SAE Brasil)
Sindicato Nacional das Empresas de Navegação Marítima (SYNDARMA)
Subsea7 Brasil (Subsea7 Brasil)

Transpetro (Transpetro)

União Nacional do Etanol de Milho (UNEM)

Wärtsilä (Wärtsilä)

Zona de Processamento de Exportação do Ceará (ZPE Ceará)

O Quadro 22 mostra as reuniões do SubGT-05 com as instituições participantes e seus respectivos segmentos no âmbito do subgrupo.

Quadro 2. Relação das reuniões do Subgrupo GT-05 – Combustível Aquaviário Sustentável, com instituição, sigla, data e natureza da participação

Reunião SubGT-05	Data	Instituição Participante	Instituição Participante - Sigla	Natureza da Instituição
1ª	14/02/2025	Ministério de Minas e Energia	MME	Órgãos e entidades
2ª	21/02/2025	Ministério de Minas e Energia	MME	Órgãos e entidades
2ª	21/02/2025	Petrobras	-	Produção de Combustíveis
2ª	21/02/2025	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis	ANP	Órgãos e entidades
3ª	07/03/2025	Ministério de Minas e Energia	MME	Órgãos e entidades
3ª	07/03/2025	Agência Nacional de Transportes Aquaviários	ANTAQ	Infraestrutura Portuária
3ª	07/03/2025	Empresa de Pesquisa Energética	EPE	Órgãos e entidades
3ª	07/03/2025	Marinha do Brasil	-	Infraestrutura Portuária
4ª	14/03/2025	Ministério de Minas e Energia	MME	Órgãos e entidades
4ª	14/03/2025	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social	BNDES	Órgãos e entidades
4ª	14/03/2025	Financiadora de Estudos e Projetos	FINEP	Órgãos e entidades
5ª	21/03/2025	Ministério de Minas e Energia	MME	Órgãos e entidades
6ª	04/04/2025	SAE Brasil	SAE	Academia, Think Tanks, Mercado e Sociedade Civil
6ª	04/04/2025	Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás	IBP	Órgãos e entidades
7ª	11/04/2025	Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais	Abiove	Produção de Combustíveis
7ª	11/04/2025	Amaggi	-	Produção de Combustíveis

7ª	11/04/2025	FS Bioenergia	-	Produção de Combustíveis
8ª	07/05/2025	Associação Brasileira de Entidades Portuárias e Hidroviárias	ABEPH	Infraestrutura Portuária
8ª	07/05/2025	Associação Brasileira de Terminais de Líquidos	ABTL	Infraestrutura Portuária
8ª	07/05/2025	Associação de Terminais Portuários Privados	ATP	Infraestrutura Portuária
8ª	07/05/2025	Complexo do Pecém	-	Infraestrutura Portuária
8ª	07/05/2025	Zona de Processamento de Exportação Ceará	ZPE Ceará	Infraestrutura Portuária
8ª	07/05/2025	Associação Brasileira de Terminais Portuários	ABTP	Infraestrutura Portuária
9ª	09/05/2025	Raízen	-	Produção de Combustíveis
10ª	16/05/2025	Porto do Açu	-	Infraestrutura Portuária
10ª	16/05/2025	Associação Brasileira de Cruzeiros Marítimos	CLIA Brasil	Logística de Navegação
10ª	16/05/2025	Associação Brasileira para o Desenvolvimento da Navegação Interior	ABANI	Logística de Navegação
10ª	16/05/2025	Associação Brasileira de Bunker	ABRABUNKER	Logística de Navegação
11ª	23/05/2025	Federação Nacional das Operações Portuárias	FENOP	Infraestrutura Portuária
12ª	23/05/2025	Marinha do Brasil	-	Órgãos e entidades
12ª	23/05/2025	Centro de Navegação Transatlântico	CENTRONAVE	Infraestrutura Portuária
12ª	23/05/2025	Associação Brasileira de Armadores de Cabotagem	ABAC	Logística de Navegação
13ª	06/06/2025	União Nacional do Etanol de Milho & Inpasa	UNEM & INPASA	Produção de Combustíveis
14ª	27/06/2025	International Council on Clean Transportation	ICCT	Academia, Think Tanks, Mercado e Sociedade Civil
14ª	27/06/2025	Sindicato Nacional das Empresas de Navegação Marítima	SYNDARMA	Logística de Navegação
14ª	27/06/2025	Associação Brasileira das Empresas de Apoio Marítimo	ABEAM	Logística de Navegação
15ª	04/07/2025	Wärtsilä	-	Fabricantes de Motores e Embarcações
15ª	04/07/2025	EPE	EPE	Órgãos e entidades

16 ^a	11/07/2025	Associação Brasileira da Indústria do Hidrogênio Verde	ABIHV	Produção de Combustíveis
16 ^a	11/07/2025	Everllence	-	Fabricantes de Motores e Embarcações
17 ^a	18/07/2025	CENERGIA COPPE/UFRJ	CENERGIA	Academia, Think Tanks, Mercado e Sociedade Civil
18 ^a	25/07/2025	Leggio Consultoria	-	Academia, Think Tanks, Mercado e Sociedade Civil
19 ^a	01/08/2025	Subsea7 Brasil	-	Logística de Navegação
19 ^a	01/08/2025	Maersk	-	Logística de Navegação
19 ^a	01/08/2025	DNV	-	Logística de Navegação
20 ^a	08/08/2025	Agroicone	-	Academia, Think Tanks, Mercado e Sociedade Civil
21 ^a	08/08/2025	Transpetro	-	Logística de Navegação
22 ^a	15/08/2025	Argus	-	Academia, Think Tanks, Mercado e Sociedade Civil
22 ^a	15/08/2025	Cebri	-	Academia, Think Tanks, Mercado e Sociedade Civil
23 ^a	21/08/2025	CMA-CGM	CMA-CGM	Logística de Navegação
24 ^a	27/08/2025	S&P Global Platts	S&P Global Platts	Academia, Think Tanks, Mercado e Sociedade Civil"
24 ^a		MSC Group	MSC	Logística de Navegação
25 ^a	29/08/2025	Caterpillar	Caterpillar	Fabricantes de Motores e Embarcações

Foram encaminhados convites acompanhados das perguntas de pesquisa para orientar as apresentações e discussões.

3.4 Dos Estudos Prévios

A sinalização regulatória recente da Organização Marítima Internacional (IMO) constitui um elemento relevante para a transição energética no transporte marítimo, com potencial de alterar, no médio e longo prazo, a dinâmica competitiva do comércio global. No entanto, esse processo ainda se encontra em evolução e cercado por incertezas institucionais importantes. Com base na Estratégia de Gases de Efeito Estufa (GEE) revisada em 2023, a IMO avançou, durante a 83^a sessão do Comitê de Proteção ao Meio Ambiente Marinho (MEPC 83), realizada em abril de 2025, na

discussão de um possível novo arcabouço para a descarbonização do setor marítimo internacional [1, 2]. Embora esse debate tenha sido amplamente interpretado como um sinal de fortalecimento da ambição climática do setor, as propostas associadas ao chamado *net zero framework* ainda não se traduziram em uma regulação definitiva e vinculante.

A expectativa de aprovação final desse arcabouço, que motivou parte significativa das análises recentes sobre demanda futura por combustíveis sustentáveis no transporte marítimo, foi frustrada na rodada decisória subsequente, ocorrida em outubro de 2025, quando a deliberação foi adiada por um ano. Esse desfecho esteve fortemente associado à oposição de países relevantes, como Estados Unidos e Arábia Saudita, cuja posição contrária tende a manter, no curto prazo, um elevado grau de incerteza quanto ao nível de ambição global efetivamente adotado pela IMO. Assim, embora a trajetória de longo prazo aponte para um endurecimento progressivo das exigências ambientais no setor, o ritmo, o desenho final dos instrumentos e seus impactos econômicos permanecem indefinidos.

Nesse contexto, a descarbonização do transporte marítimo deve ser compreendida não como um compromisso já plenamente incorporado às regras do comércio internacional, mas como um vetor estratégico em consolidação, cuja materialização dependerá de decisões regulatórias futuras. Ainda assim, mesmo na ausência de um arcabouço final aprovado, o debate em curso na IMO já influencia expectativas de mercado, decisões de investimento e estratégias de armadores, afretadores e operadores logísticos, afetando custos operacionais, acesso a mercados, planejamento de frota, escolha de combustíveis e investimentos em infraestrutura portuária. Para países fortemente dependentes do transporte marítimo, como o Brasil, esse ambiente de transição regulatória representa simultaneamente riscos e oportunidades.

Sob essa ótica, as discussões conduzidas pela IMO, criam um cenário potencialmente favorável ao aproveitamento das vantagens comparativas brasileiras. Destacam-se, entre essas vantagens, a elevada participação de fontes renováveis na matriz energética nacional, a escala e a diversidade da produção de biocombustíveis de baixa intensidade de carbono e a capacidade do país de desenvolver soluções alinhadas a critérios de combustíveis de emissão zero ou quase zero (*Zero or Near-Zero – ZNZ*), caso esses venham a ser incorporados de forma mais robusta à

regulação internacional [3, 4]. O posicionamento estratégico do Brasil, portanto, deve considerar tanto o potencial de liderança nesse novo mercado quanto as incertezas associadas à definição final do arcabouço regulatório global.

Para viabilizar o cumprimento das metas estabelecidas na Estratégia de Gases de Efeito Estufa (GEE) da IMO revisada em 2023, a Organização Marítima Internacional passou a discutir a estruturação do chamado *Net-Zero Framework* (NZF)¹, concebido como um potencial arcabouço regulatório global para a descarbonização do transporte marítimo. Esse framework, ainda em processo de negociação e sem aprovação definitiva, está baseado em dois pilares complementares: um pilar técnico, voltado à definição de padrões de intensidade de emissões dos combustíveis marítimos, e um pilar econômico, centrado em mecanismos de precificação de carbono como instrumento de incentivo à redução de emissões no setor.

No âmbito do pilar técnico, a proposta do NZF prevê a introdução de um Padrão Anual de Intensidade de GEE do Combustível (*GHG Fuel Intensity – GFI*), destinado a estabelecer trajetórias de redução progressiva da intensidade de emissões das embarcações. O alvo do GFI seria inicialmente definido com base na intensidade de emissões de um combustível fóssil de referência em 2008 e, a partir desse patamar, reduzido anualmente segundo um fator de redução pré-estabelecido, de forma a alinhar o setor às metas climáticas da Organização. A eventual verificação de conformidade com o alvo anual de GFI estaria baseada na intensidade de emissões de GEE ao longo de todo o ciclo de vida do combustível, desde sua produção até o uso final (*well-to-wake*), conforme as Diretrizes de Análise de Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment – LCA Guidelines*) da IMO [5].

Um aspecto particularmente relevante para o Brasil, caso esse modelo venha a ser efetivamente incorporado à regulação internacional, refere-se à definição dos chamados “valores padrão” de emissão dos combustíveis no âmbito das diretrizes de LCA. É fundamental que esses valores reflitam especificidades regionais, considerando diferenças nos modelos de produção agrícola, nas rotas tecnológicas e nas condições locais de produção. A adoção de valores padrão baseados em dados de outras regiões, como os europeus — tipicamente mais conservadores — poderia subestimar a vantagem competitiva dos biocombustíveis brasileiros, cuja cadeia produtiva apresenta, em muitos casos, desempenho ambiental superior. Assim, a incorporação de valores regionais configura um elemento crítico para uma avaliação

mais justa e precisa do potencial brasileiro, caso o NZF ou instrumentos similares venham a ser implementados [5].

O pilar econômico institui um mecanismo de precificação de emissões, estruturado como um sistema de créditos. Embarcações que utilizarem combustíveis com intensidade de GEE superior à meta estabelecida deverão adquirir Unidades de Remediação (Remedial Units – RUs). Por outro lado, navios que superarem a meta, ao empregar combustíveis de menor intensidade de GEE, receberão Unidades de Superávit (Surplus Units – SUs), passíveis de comercialização. Os recursos arrecadados com a aquisição compulsória de RUs por embarcações menos eficientes serão integralmente direcionados ao IMO Net-Zero Fund, configurando um mecanismo que internaliza o custo da poluição e direciona esses recursos para o financiamento da inovação e da transição do setor marítimo. As embarcações que utilizarem combustíveis de emissões zero ou quase zero (ZNZs) serão elegíveis para receber recompensas provenientes desse Fundo.

Nesse contexto regulatório e de mercado, a efetiva redução das emissões passa a depender não apenas de mecanismos de monitoramento e precificação, mas, sobretudo, da disponibilidade e adoção em escala de combustíveis alternativos de menor intensidade de carbono.

O cumprimento das metas de médio e longo prazos de redução de emissões do setor marítimo depende do avanço tecnológico e da expansão em escala de combustíveis alternativos com maior conteúdo renovável e menor pegada de carbono, em substituição aos combustíveis fósseis tradicionais [6]. Atualmente, diversos combustíveis estão em avaliação, variando entre opções de baixo carbono, carbono neutro ou carbono negativo. Entre as principais alternativas para a descarbonização marítima destacam-se os biocombustíveis, o GNL, os combustíveis sintéticos (e-fuels), além de metanol, amônia e hidrogênio de baixo carbono. Cada opção apresenta vantagens e limitações próprias, e sua adoção depende de contextos regionais, tecnológicos e operacionais. No Brasil, diferentes rotas tecnológicas vêm sendo exploradas, como biodiesel e HVO, etanol e metanol. A escolha da solução mais adequada envolve múltiplos fatores, incluindo custos, densidade energética, maturidade tecnológica, segurança operacional, infraestrutura de abastecimento e adequação aos diferentes tipos de embarcações e rotas. [6]

Diversos biocombustíveis produzidos no país já atendem ou se encontram muito próximos desses patamares, conferindo ao Brasil uma vantagem competitiva relevante, mesmo em um cenário de incerteza regulatória. O Óleo Vegetal Hidrotratado (HVO) apresenta intensidade de emissões em torno de 14,9 gCO₂eq/MJ. O etanol registra valores entre 16 e 22 gCO₂eq/MJ, a depender do processo produtivo, enquanto o biodiesel (FAME) apresenta uma faixa mais ampla, entre 16 e 35 gCO₂eq/MJ, conforme a matéria-prima utilizada — como soja, sebo bovino ou óleos residuais. Quando produzido a partir de resíduos ou insumos de baixo impacto ambiental, o biodiesel pode atingir intensidades próximas a 19 gCO₂eq/MJ [7].

Tanto o etanol quanto o biodiesel derivado de resíduos demonstram desempenho ambiental expressivo, com intensidades da ordem de 19 gCO₂eq/MJ, em comparação aos cerca de 67,8 gCO₂eq/MJ dos combustíveis fósseis equivalentes, o que representa uma redução aproximada de 72% nas emissões. Essas características os consolidam como alternativas viáveis no curto, médio e longo prazos para a descarbonização de frotas marítimas, permitindo reduções imediatas de emissões sem a necessidade de mudanças tecnológicas disruptivas.

Os combustíveis *drop-in* têm se consolidado como uma solução estratégica para a descarbonização marítima, dada sua total compatibilidade com motores e infraestruturas atuais, eliminando a necessidade de retrofits dispendiosos. Nesse cenário, o VLS B24 (76% bunker fóssil e 24% biodiesel) surge como uma alternativa de baixo teor de enxofre com alto desempenho ambiental. Dados da Petrobras indicam que essa mistura reduz em 17% a emissão de poluentes em comparação ao bunker 100% mineral, considerando todo o ciclo de vida do produto. Em 2024 por meio da autorização nº 402, de 12 de Julho, a empresa foi autorizada a comercializar o produto. Como resultado, a Petrobras firmou um contrato para o fornecimento desse combustível marítimo com parcela de biodiesel ao armador norueguês Odfjell, prevendo a entrega de até 12 mil toneladas ao longo de 2026.

Internacionalmente, a Maersk iniciou testes com uma mistura 50/50 de etanol e metanol no navio Laura Mærsk, um navio porta-contêineres dual-fuel. Esses testes confirmaram que o etanol pode ser integrado de forma segura e eficiente com o metanol, mantendo o desempenho do motor e abrindo caminho para misturas com maior proporção de etanol, além de possibilitar testes futuros com 100% de etanol. Essa iniciativa demonstra o potencial do etanol como combustível escalável de baixo

carbono para o transporte marítimo, reforçando o papel do Brasil como fornecedor estratégico de biocombustíveis [8].

Outro diferencial estratégico dos biocombustíveis é o seu potencial de integração com tecnologias de remoção de dióxido de carbono, como a bioenergia com captura e armazenamento de carbono (*Bioenergy with Carbon Capture and Storage – BECCS*). Essa combinação pode resultar em emissões líquidas negativas, contribuindo para a compensação de emissões residuais e para o cumprimento das metas de longo prazo de neutralidade climática do setor marítimo [9].

O país possui condições singulares para liderar a oferta de soluções de baixo carbono para o setor. O Brasil é um dos maiores produtores e consumidores de biocombustíveis do mundo, com uma cadeia produtiva madura e em expansão. Em 2024, a produção total de etanol (de cana e milho) atingiu o recorde de 37,3 bilhões de litros, enquanto o consumo de biodiesel atingiu 9,1 bilhões de litros [7].

A competitividade do Brasil na descarbonização do transporte marítimo é marcada por vantagens comparativas naturais relevantes, contrabalançadas por desafios logísticos e riscos regulatórios internacionais [10]. O país possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, com elevada participação de fontes renováveis, o que lhe confere uma posição estratégica na produção de combustíveis de baixo carbono. Por outro lado, a localização geográfica do Brasil impõe desafios significativos. As longas rotas de exportação, combinadas com a predominância de commodities de baixo valor agregado, aumentam a sensibilidade do comércio exterior aos custos de combustível, que representam parcela expressiva do frete marítimo [11]. A ausência de um mercado regulado de carbono no Brasil pode resultar em maior carga tributária sobre exportações, mas, ao mesmo tempo, a menor intensidade de carbono dos processos produtivos nacionais pode favorecer a competitividade dos produtos brasileiros e atrair investimentos industriais. No campo regulatório, mecanismos de ajuste de carbono na fronteira, como o CBAM europeu, representam simultaneamente um risco e uma oportunidade [10].

Por fim, a estratégia brasileira é reforçada pela atuação em fóruns e iniciativas internacionais, como acordos bilaterais para o desenvolvimento de corredores verdes marítimos e a liderança na Global Biofuels Alliance, que busca harmonizar padrões e certificações [12]. Em conjunto, esses fatores posicionam o Brasil como um potencial

protagonista na descarbonização marítima, desde que consiga mitigar os desafios logísticos, tecnológicos e regulatórios associados ao comércio internacional. [13]

Na visão de longo prazo o hidrogênio de baixo carbono e seus derivados, como amônia e metanol, são considerados soluções para a descarbonização profunda do transporte marítimo. O Brasil possui um potencial técnico extraordinário para produzir até 1,8 gigatonelada de hidrogênio por ano, e o Plano Nacional do Hidrogênio (PNH₂) busca consolidar o país como o produtor mais competitivo do mundo [14].

No entanto, a percepção desse potencial ainda é desigual no setor portuário. Uma pesquisa da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) revelou que 82% dos terminais privados não enxergam potencial na cadeia de valor do hidrogênio. Em contraste, os portos públicos demonstram uma visão mais otimista: 26% veem vocação na produção e 19% na formação de hubs de energia [5]. Essa disparidade sugere que, enquanto os portos públicos, alinhados a diretrizes estatais de longo prazo, enxergam o hidrogênio como um vetor de desenvolvimento estratégico, os terminais privados mantêm um foco mais pragmático em modelos de negócio com retorno de investimento comprovado no curto e médio prazo.

Vários portos já estão se posicionando como futuros centros de produção e exportação de hidrogênio, atraindo investimentos e firmando parcerias estratégicas, conforme mostrado no Quadro 3 [14] [2].

Quadro 3. Principais Iniciativas de baixo carbono em Portos e Complexos Industriais do Brasil [14] [2].

Porto/Complexo	Iniciativas Relevantes
Complexo do Pecém (CE)	Considerado um dos principais candidatos a hub de hidrogênio verde, com diversos memorandos de entendimento assinados para projetos de produção e exportação.
Porto do Açú (RJ)	Desenvolve projetos para se tornar um hub de produtos de baixo carbono, incluindo hidrogênio, amônia verde e combustíveis sintéticos.
Complexo de SUAPE (PE)	Sedia o TechHub de Hidrogênio Verde, uma iniciativa que concentra projetos de inovação focados na produção, transporte e armazenamento do H ₂ V.

O GNL já é uma realidade tecnológica no transporte marítimo e é frequentemente considerado um combustível de transição. No entanto, sua contribuição para a descarbonização é limitada. Estudos indicam que, em condições ideais, o uso de GNL pode resultar em reduções de emissões de gases de efeito estufa quando comparado aos combustíveis convencionais derivados de petróleo; entretanto, essas reduções são modestas e insuficientes para atender às metas mais ambiciosas de descarbonização estabelecidas pela Organização Marítima

Internacional (IMO) para 2050 [14]. Além disso, diversos trabalhos destacam que emissões fugitivas de metano ao longo da cadeia do gás natural — incluindo produção, liquefação, transporte, abastecimento e combustão a bordo — podem comprometer significativamente a intensidade de carbono do GNL. Dependendo da taxa de vazamento de metano, o desempenho climático do GNL pode ser substancialmente inferior ao esperado, podendo, em alguns cenários, igualar ou até superar as emissões do combustível fóssil convencional equivalente. No Brasil, o principal gargalo para a disseminação do GNL como combustível marítimo é a infraestrutura ainda incipiente. Faltam terminais de abastecimento e um arcabouço regulatório, legal e tributário adequado para viabilizar os investimentos necessários. O caso da mineradora Vale é emblemático: apesar de possuir navios novos preparados para operar com GNL (*LNG-ready*), a empresa optou por instalar *scrubbers* (sistemas de tratamento de gases) devido à falta de infraestrutura de abastecimento no país [15].

Apesar do imenso potencial brasileiro na oferta de combustíveis sustentáveis, a viabilidade da transição energética dependerá criticamente da preparação e modernização da infraestrutura logística e portuária do país.

Com base em um levantamento detalhado conduzido pela ANTAQ [5, 4] verificou-se que o nível de prontidão dos portos brasileiros para a transição energética apresenta um descompasso significativo: enquanto as iniciativas de otimização operacional já se encontram em estágio avançado, a preparação da infraestrutura voltada aos combustíveis do futuro ainda é incipiente. Essa discrepância evidencia, simultaneamente, os progressos alcançados e as lacunas estratégicas que precisam ser superadas para que o setor portuário avance de forma sustentável rumo à descarbonização [5].

O ponto de partida para uma estratégia eficaz de descarbonização é a medição consistente das emissões. Contudo, o diagnóstico realizado pela ANTAQ evidencia uma lacuna relevante nesse aspecto. Atualmente, apenas cinco portos públicos — São Sebastião, Fortaleza, Santos, Suape e Itaqui — realizam inventários de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), sendo que somente os três últimos consideram todos os escopos [5].

O Escopo 1 abrange as emissões diretas sob controle e responsabilidade da própria organização; o Escopo 2 refere-se às emissões associadas à energia elétrica

adquirida para a execução das operações; e o Escopo 3 inclui outras emissões indiretas, que, embora não estejam sob controle direto da autoridade portuária ou dos terminais, integram a cadeia de valor [5].

A inclusão do Escopo 3 — que contempla as emissões provenientes das embarcações e do transporte terrestre relacionados às atividades portuárias — é fundamental para se obter um diagnóstico completo da pegada de carbono do setor. Sua ausência constitui um ponto cego crítico para o planejamento estratégico e a formulação de políticas eficazes de descarbonização portuária [5].

A situação é ainda mais desafiadora quando se trata do estabelecimento de metas. Somente 26% dos terminais privados e 7% dos portos públicos (correspondendo apenas a Suape e Natal) possuem metas formais de redução de emissões. Este dado evidencia que a grande maioria das instalações portuárias brasileiras ainda se encontra em um estágio inicial de planejamento, sem compromissos mensuráveis para a descarbonização de suas operações [3, 5, 4].

A prontidão para adotar novas tecnologias e combustíveis é um indicador chave da capacidade do setor de se adaptar às novas regulamentações. O levantamento da ANTAQ revela um progresso heterogêneo entre diferentes tipos de iniciativas, conforme detalhado no Quadro 4 [4] [5].

Quadro 4. Nível de Maturidade das Iniciativas de Transição Energética nos Portos Brasileiros [5]

Estágio de Implementação	Iniciativas Relevantes	Dados-Chave
Avançado	Sistemas inteligentes de gerenciamento logístico, medidas de eficiência energética, geração de energia renovável para uso próprio.	Maior grau de implementação segundo o diagnóstico.
Incipiente	Fornecimento de energia elétrica da terra (OPS).	Apenas 15% das instalações em fase de planejamento; nenhuma com sistema implementado.
Não Iniciado	Ações relacionadas à cadeia de valor do hidrogênio (produção, abastecimento, exportação).	Nenhuma ação implementada; 59% dos respondentes não consideram aplicável à sua operação.

Ainda de acordo com o relatório da ANTAQ [5, 4] , os operadores portuários identificam barreiras distintas, conforme mostrado no Quadro 5 para cada tipo de iniciativa de descarbonização. Os desafios financeiros são predominantes para projetos que exigem alto investimento de capital, enquanto os desafios

mercadológicos são mais relevantes para novas tecnologias e combustíveis cuja demanda ainda é incerta.

Quadro 5. Principais Desafios das Iniciativas de Descarbonização nos Portos Brasileiros [5]

Iniciativa de Descarbonização	Principal Desafio Apontado
Geração de energia renovável	Financeiro
Eletrificação de equipamentos	Financeiro
Incentivos a embarcações	Financeiro
Sistema OPS (<i>On-Shore Power Supply</i>)	Financeiro
Fornecimento de combustíveis menos poluentes	Mercadológico
Iniciativas de Hidrogênio Verde	Mercadológico

A análise precedente converge para uma conclusão inequívoca: o Brasil detém uma janela de oportunidade histórica, mas finita, impulsionada pela regulação da IMO e seu vasto potencial em bioenergia. No entanto, barreiras significativas de infraestrutura, custo e coordenação regulatória ameaçam essa vantagem competitiva. Para capitalizar este potencial, é imperativo que os setores público e privado adotem uma agenda de ações coordenadas e decisivas. Dessa forma, esta seção reúne um conjunto de recomendações estratégicas, fundamentadas em diferentes estudos, com o objetivo de superar esses desafios e impulsionar a transição energética no setor marítimo.

No âmbito do setor do Setor Público (Governo Federal), destaca-se:

1. Desenvolver um Marco Regulatório Nacional: É fundamental alinhar a regulamentação brasileira à da IMO, estabelecendo diretrizes claras e harmonizadas para a produção, certificação (incluindo Análise de Ciclo de Vida - LCA), armazenamento e abastecimento de combustíveis, seja de biodiesel, etanol, hidrogênio, amônia e diesel verde. Esse marco deve prezar pela neutralidade tecnológica e de matérias-primas, de modo a permitir a participação ampla e competitiva dos diferentes agentes na transição energética do setor marítimo, assegurando eficiência econômica e justiça concorrencial. Além dos aspectos normativos, é essencial que o marco regulatório considere as limitações práticas da infraestrutura portuária brasileira. Atualmente, muitos portos não estão adequadamente preparados para receber e manusear determinados combustíveis alternativos, como etanol e biodiesel, em razão da escassez de áreas disponíveis para a instalação de tanques de armazenamento, da ausência de infraestrutura dedicada e da necessidade de atendimento a rigorosos requisitos de segurança operacional e

ambiental. O armazenamento e o abastecimento desses combustíveis demandam medidas específicas de mitigação de riscos, incluindo sistemas de contenção, combate a incêndio, segregação de áreas, planos de emergência e capacitação das equipes envolvidas. A ausência de diretrizes regulatórias claras para esses aspectos físicos e operacionais aumenta a incerteza regulatória, eleva o custo de capital (CAPEX), encarece os custos operacionais (OPEX) e desestimula o investimento privado em infraestrutura portuária e logística. Nesse sentido, a criação de um ambiente regulatório previsível, que integre requisitos técnicos, padrões de segurança e procedimentos de licenciamento, é condição essencial para destravar investimentos, orientar o planejamento dos portos e viabilizar, de forma segura e eficiente, a implementação de combustíveis de baixo carbono no transporte marítimo brasileiro.

2. Reformular políticas, planos e programas para incentivar a migração modal para modos de transportes menos poluentes e mais eficientes. Essa transição contribuirá para equilibrar a matriz de transportes brasileira, atualmente concentrada no modal rodoviário, mais poluente [16, 17]. A migração modal favorecerá a sustentabilidade ambiental e a competitividade econômica, apoiando a agenda ambiental do país e incentivando o desenvolvimento do transporte aquaviário [18].

3. Criar Mecanismos de Fomento e Financiamento: O alto custo inicial das novas tecnologias é uma das principais barreiras. O governo deve estruturar linhas de crédito específicas, como as do BNDES, e oferecer incentivos fiscais para projetos de infraestrutura portuária (ex: sistemas OPS, tancagem para novos combustíveis) e para a produção em escala de combustíveis sustentáveis.

4. Padronizar a Gestão de Emissões: Para superar a atual lacuna de dados, recomenda-se a criação de um guia nacional para a elaboração de inventários de GEE no setor portuário. Inspirado em iniciativas internacionais, como a da *Environmental Protection Agency* (EPA) dos EUA, esse guia padronizaria metodologias e permitiria um diagnóstico preciso do perfil de emissões do setor, embasando metas e políticas públicas. É importante ter como base a análise de ciclo de vida completa dos combustíveis.

5. Promover Hubs de Energia e Clusters Marítimos: O governo deve incentivar ativamente a formação de clusters tecnológicos e industriais nos portos com clara vocação energética, como Pecém, Açú e Suape. Políticas de apoio podem catalisar investimentos, concentrar expertise e gerar economias de escala,

transformando esses portos em polos de inovação, fornecimento e exportação de energia limpa.

6. O governo deve incentivar ativamente a formação de clusters tecnológicos e industriais em portos com clara vocação energética, como Pecém, Açú e Suape. Políticas públicas direcionadas podem catalisar investimentos, concentrar conhecimento técnico, fomentar inovação e gerar economias de escala, transformando esses portos em polos estratégicos para a produção, abastecimento e exportação de energia de baixo carbono. No entanto, a relevância e a configuração desses clusters devem considerar as características das rotas marítimas predominantes e os perfis operacionais das embarcações que utilizam cada porto [19]. O Porto do Açú, por exemplo, apresenta potencial para se consolidar como um hub de soluções energéticas voltadas a navios exportadores de petróleo e derivados, especialmente no contexto de uma eventual transição energética desse segmento. Sua infraestrutura industrial, localização estratégica e proximidade com operações offshore o tornam um candidato natural para o desenvolvimento de combustíveis de menor intensidade de carbono e serviços associados à descarbonização marítima [20]. Por outro lado, soluções de produção e logística de combustíveis alternativos e serviços energéticos devem priorizar os portos do Sul e Sudeste, em especial Santos e os portos do Paraná, que concentram grande parte do tráfego de contêineres, soja e fertilizantes. Esses segmentos possuem maior potencial de adoção de novas soluções energéticas no curto e médio prazo, dada a regularidade das rotas, a maior previsibilidade operacional e a crescente pressão regulatória e comercial sobre as cadeias logísticas internacionais [21]. Cabe destacar que cargas como minério de ferro, soja e petróleo bruto operam predominantemente em rotas de longa distância com destino à Ásia, onde, em muitos casos, os preços dos combustíveis e a disponibilidade de infraestrutura tornam o abastecimento mais competitivo. Como resultado, apenas uma parcela reduzida dos navios de commodities realiza abastecimento no Brasil, o que limita, no curto prazo, a viabilidade econômica de hubs de combustíveis alternativos voltados exclusivamente a esse tipo de tráfego. Dessa forma, o planejamento de clusters marítimos energéticos no país deve ser seletivo e alinhado às dinâmicas reais das rotas globais, evitando investimentos desconectados da demanda efetiva.

No âmbito do Setor Privado (Instalações Portuárias, Armadores, Indústria de Energia) [5]:

1. Elaborar Planos de Descarbonização Individuais: Cada instalação portuária deve desenvolver seu próprio *roadmap* de descarbonização. O processo deve começar com um inventário de emissões robusto (incluindo o Escopo 3, que abrange as emissões da cadeia de valor) e culminar no estabelecimento de metas baseadas na ciência, alinhadas com os objetivos climáticos globais.

2. Investir em Projetos-Piloto: A colaboração em projetos-piloto é essencial para testar a viabilidade técnica, operacional e econômica dos combustíveis sustentáveis de navegação (Biodiesel, etanol, HVO, bio-bunker, metanol) e tecnologias (OPS). Essas iniciativas permitem reduzir a incerteza, construir conhecimento prático e preparar as operações para a adoção em larga escala.

3. Formar Parcerias Estratégicas nacionais e internacionais: A transição energética é um desafio complexo que nenhuma empresa pode enfrentar sozinha. A cooperação entre portos, produtores de energia, indústria naval e de propulsão naval, empresas de navegação e instituições de pesquisa é fundamental para compartilhar custos, riscos e conhecimento, acelerando a curva de aprendizado e a adoção de novas soluções.

4. Analisar a Viabilidade de Combustíveis Alternativos: as empresas de navegação devem realizar análises de custo-benefício, como a Curva de Custo Marginal de Abatimento (Curva MAC) [22], para identificar e priorizar os investimentos mais eficazes em redução de emissões para sua realidade operacional. Essa ferramenta ajuda a garantir que os recursos sejam alocados nas iniciativas com maior impacto e retorno [5]. Os portos e terminais também devem realizar essas análises para veículos utilizados na operação portuária, para contribuir na redução das emissões de toda a operação logística atrelada ao setor aquaviário.

5. Desenvolver e implementar uma política pública abrangente que promova a integração eficiente e sustentável dos modais de transporte (marítimo, ferroviário, rodoviário e hidroviário) em toda a cadeia logística nacional, com foco primordial na descarbonização das operações portuárias e de toda cadeia logística de transportes, garantindo que os produtos cheguem aos portos com agilidade e no tempo correto.

Nesse cenário, conclui-se que a transição energética marítima deve ser encarada não apenas como um desafio regulatório, mas como uma oportunidade estratégica para o Brasil fortalecer sua posição de liderança global em energias renováveis. A atuação coordenada entre os setores público e privado tem o potencial de destravar investimentos, impulsionar a inovação e gerar valor econômico e ambiental para toda a cadeia logística nacional.

4. ANÁLISES E DISCUSSÕES

4.1 Descarbonização do Transporte Aquaviário

As análises desenvolvidas neste item decorrem da Nota Técnica Descarbonização do Transporte Aquaviário, elaborada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que serviu de base para a caracterização do panorama do transporte aquaviário brasileiro. Desse modo, o texto a seguir corresponde à reprodução integral do conteúdo técnico¹ daquela Nota, preservadas as referências originais nela apresentadas.

4.1.1 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 às atividades offshore 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

¹ Foram feitas apenas algumas modificações para melhor fluidez e padronização de termos neste documento

de apoio portuário é realizada exclusivamente nos portos e terminais aquaviários, para atendimento a embarcações e instalações portuárias [23].

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) [24]. De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2034 [25], 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 [24]. 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 1. Essa evolução foi possível graças ao arcabouço legal² e iniciativas presentes no Brasil que buscam favorecer a construção de embarcações de bandeira nacional [24].

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% [4]. 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 2 apresenta a movimentação de cargas no Brasil, no período 2010-2023.

² A partir do marco regulatório Lei 9.432/1997, observa-se um processo de revigoração 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 [26].

Figura 1. Evolução da Frota de Apoio Marítimo no Brasil e principais marcos no setor [26]

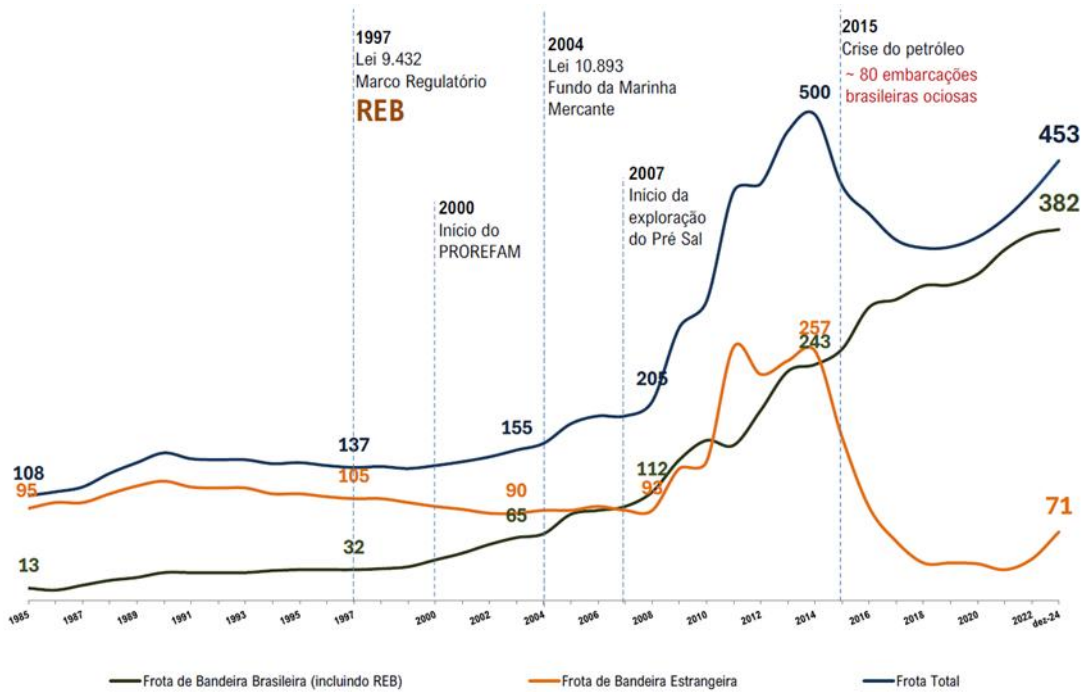
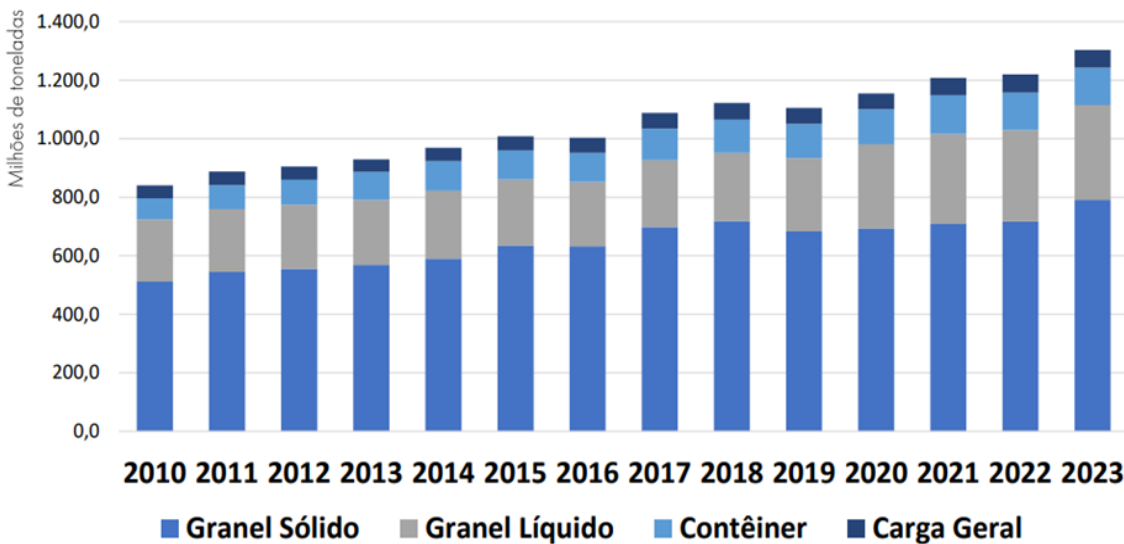


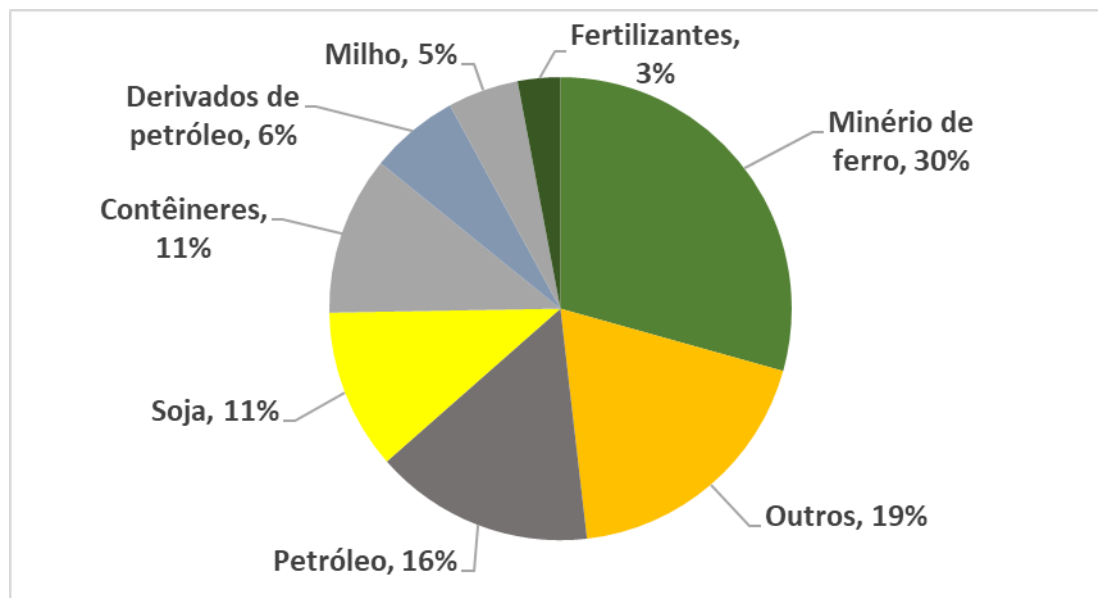
Figura 2. Movimentação portuária de cargas no Brasil (2010 – 2023) [4]



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 [27]. A Figura 3 aponta o perfil das principais mercadorias movimentadas no sistema portuário do País, em 2023.

Figura 3. Principais mercadorias movimentadas nos portos brasileiros, em 2023 [27]

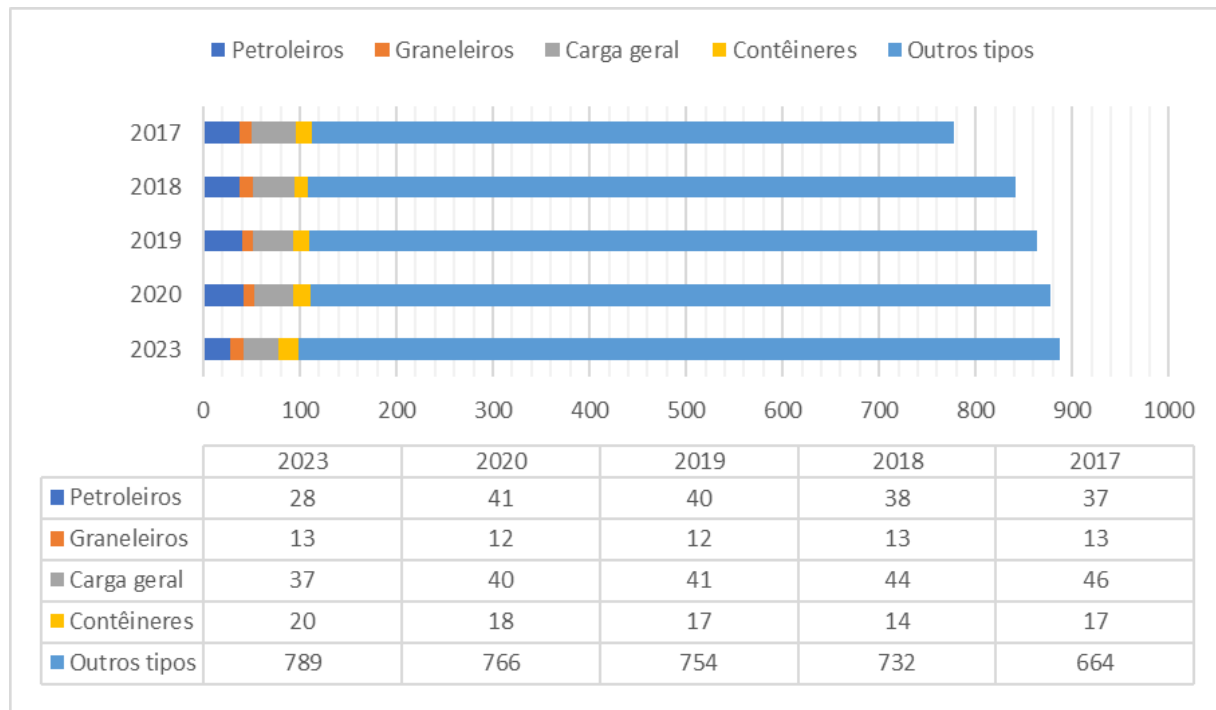


De acordo com a ANTAQ [4], o minério de ferro é escoado principalmente pelos portos do Nordeste e Sudeste; para o petróleo bruto, 50% da movimentação é realizada por terminais do Rio de Janeiro; os maiores movimentadores de soja são os portos de Santos, Paranaguá e Itaquí. Já os portos organizados são 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 [4]. 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 4 apresenta a frota nacional, por tipo de navio e quantidade.

Figura 4. Frota brasileira de navios, por tipo e quantidade (2017- 2023) [28]



4.1.2 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 para embarcações.

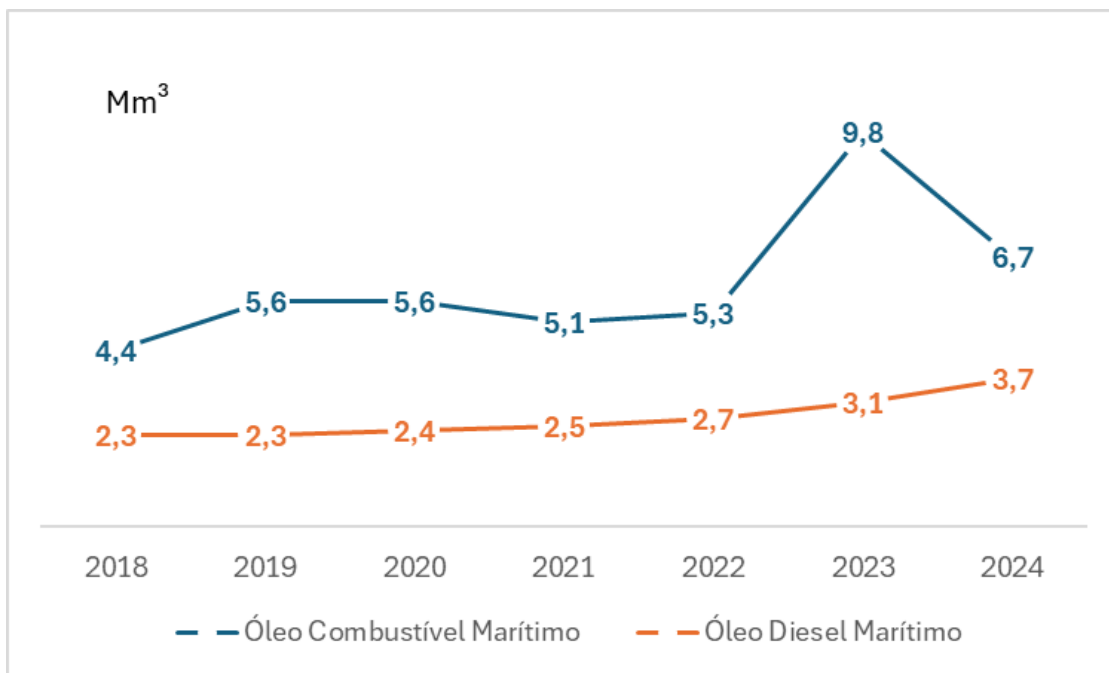
Os combustíveis utilizados nas embarcações podem ser classificados em duas categorias:

- 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;
- 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 [29]. 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 [30].

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 5 apresenta a produção destes combustíveis no período 2018-2024 [31].

Figura 5. Produção de combustíveis marítimos nas refinarias brasileiras (2018-2024) [31]

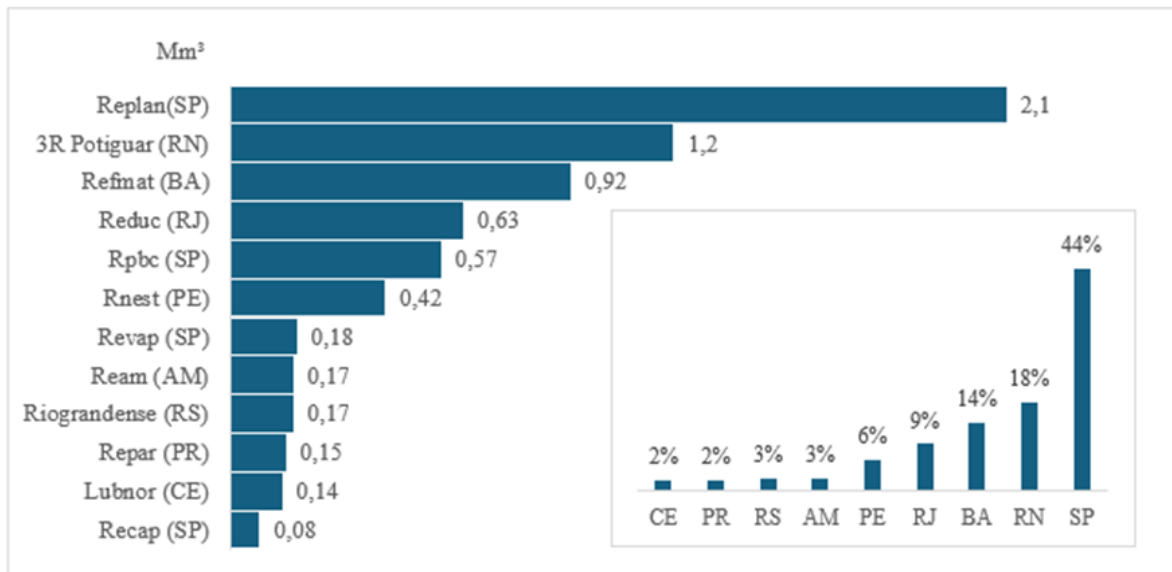


Observa-se que em 2023, a produção de bunker aumentou cerca de 85% em relação a 2022. Da mesma forma, desde 2019, nota-se um crescimento na produção de diesel marítimo (de 19% em 2024, quando comparado a 2023).

A

Figura 6 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 [31].

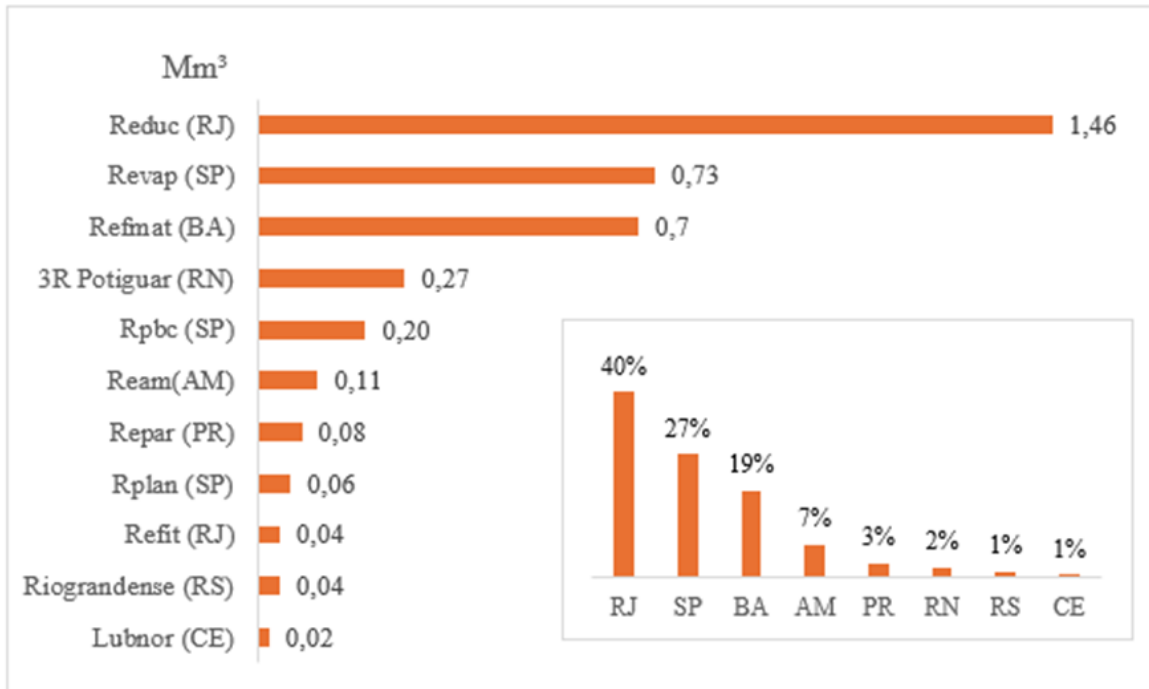
Figura 6. Produção nacional de óleo combustível marítimo por refinaria e participação por UF (2024)
[31]



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 a **Figura 6**. O abastecimento das embarcações por combustíveis marítimos ocorre principalmente por meio de terminais aquaviários (TA) localizados ao longo da costa brasileira. Na realidade das operações de apoio marítimo, esse abastecimento é frequentemente realizado por barcaças quando o navio está atracado, havendo também embarcações fluideiras dedicadas ao fornecimento de combustível para outras embarcações e para plataformas offshore. A

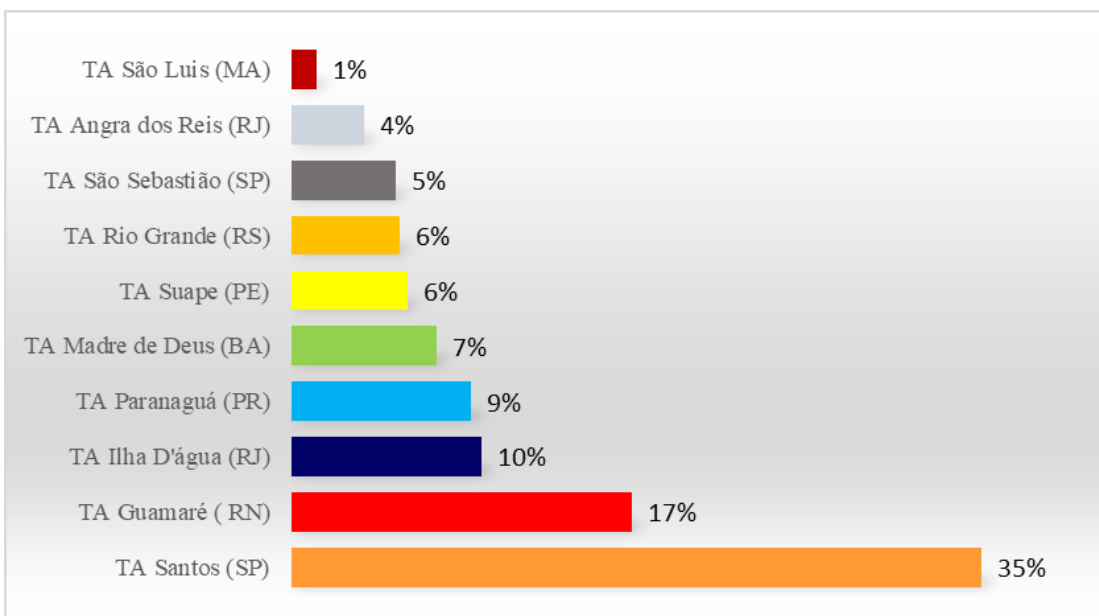
Figura 7 aponta a participação dos terminais na movimentação de combustíveis marítimos (OCM) com evidência para os terminais da Região Sudeste (Santos, São Sebastião, Ilha d'Água e Angra dos Reis) que juntos, representaram 54%, em 2024 [15] [16].

Figura 7. Produção nacional de óleo diesel marítimo por refinaria e participação por UF (2024) [31]



O abastecimento das embarcações por combustíveis marítimos ocorre principalmente por meio de terminais aquaviários (TA) localizados ao longo da costa brasileira.

Figura 8. Participação dos terminais aquaviários na movimentação de óleo combustível marítimo (2024) [32] [33].



Importante destacar o crescimento de 40% (2023) das operações de transbordo denominadas ship-to-ship (STS) - transferência de carga de uma embarcação para

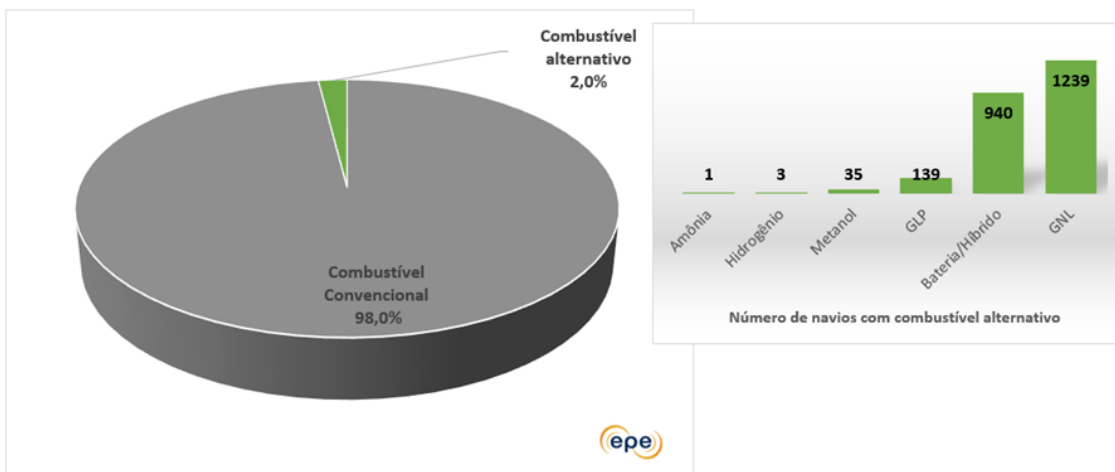
outra em mar aberto - refletindo o crescimento do mercado de exportação de petróleo, a demanda por combustíveis e a importação de gás natural para geração térmica. As operações STS, incluem ainda o bunkering, que é a operação de abastecimento por combustível marítimo, para consumo e propulsão das embarcações, o que amplia a eficiência e a capacidade de abastecimento marítimo [34].

4.1.3 Combustíveis Marítimos Alternativos

4.1.3.1 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 8. 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) [35] [36].

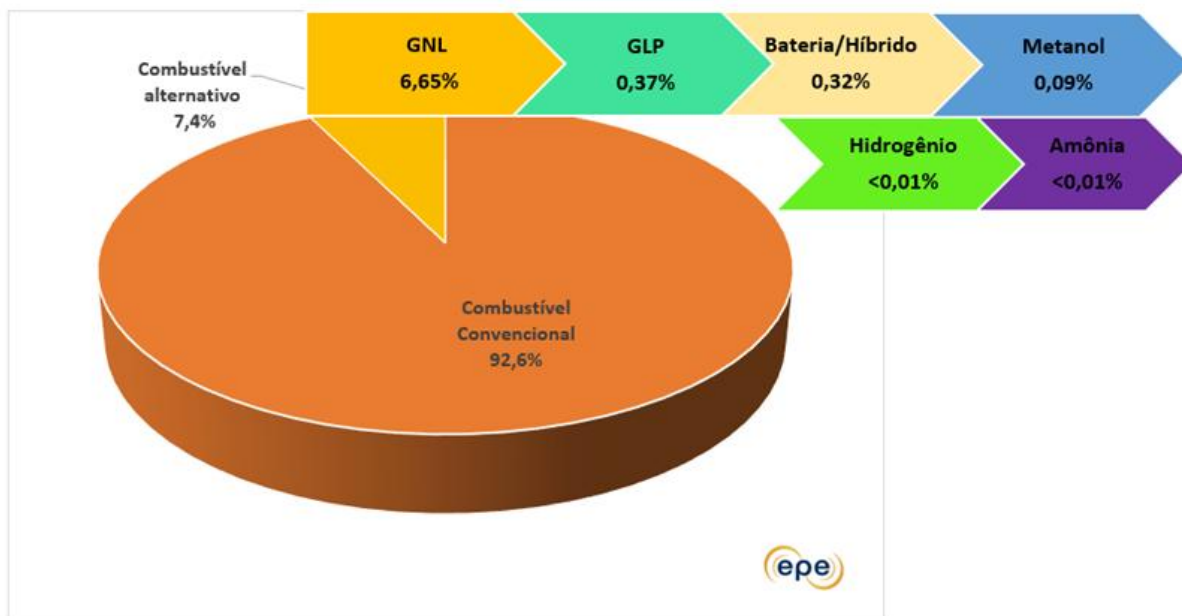
Figura 9. Consumo de combustível alternativo na frota mundial de navios, em junho 2024[36]



De acordo com a DNV [36], 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)³, 92,6% dos navios em operação, utilizam combustíveis convencionais, enquanto, 7,4% utilizam combustíveis alternativos de acordo com a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** [35] [36].

Figura 10. Consumo de combustível alternativo, na frota mundial de navios, segundo arqueação bruta (AB), em junho 2024 [36]

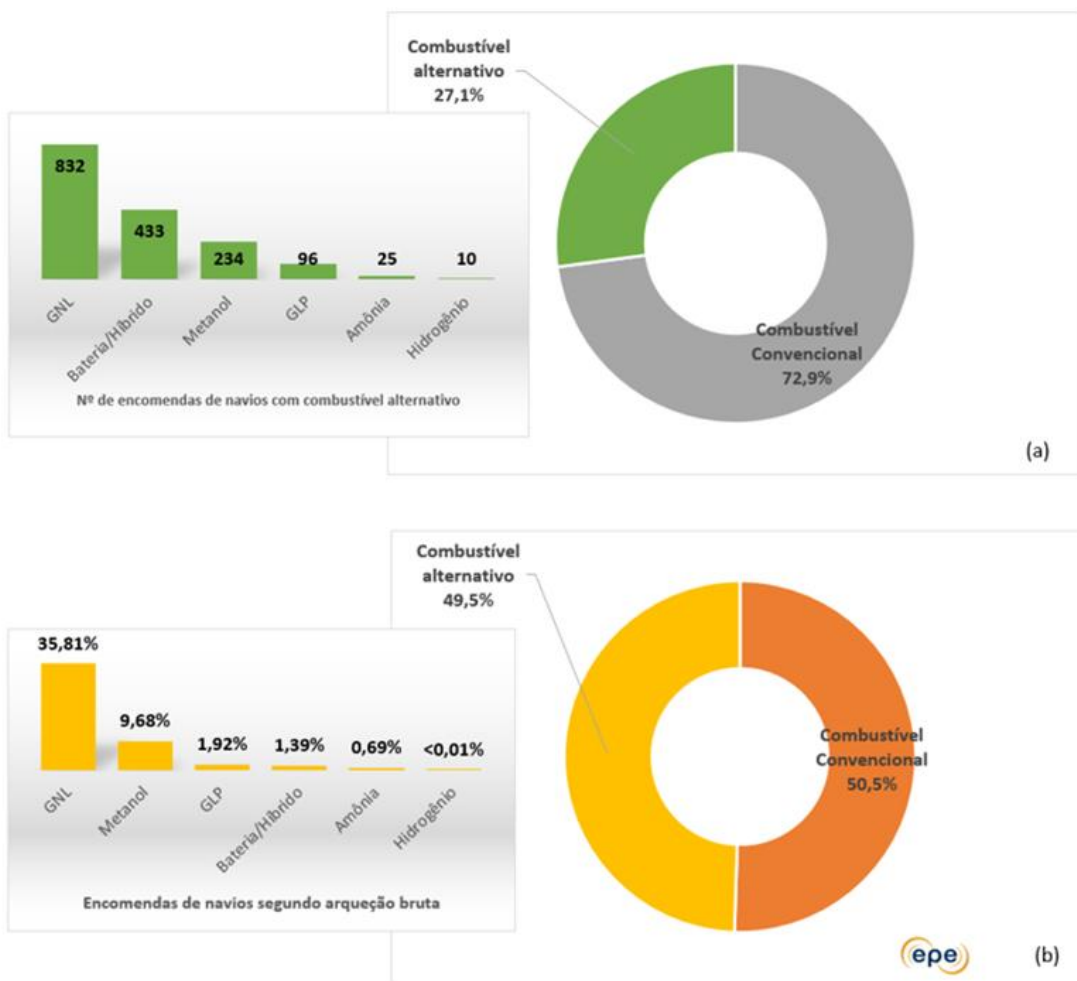


Em termos de “número de navios”, GNL e bateria/híbrido são tecnologias/combustíveis predominantes, entretanto, em “arqueação bruta”, navios a GNL são a maioria (6,65%), sendo as opções por navios movidos a bateria/híbrido, aplicados principalmente a embarcações menores. Ressalta-se que os navios movidos a bateria quase sempre têm grupos geradores movidos a óleo combustível como reserva [36]

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 11.

³ 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 [135].

Figura 11. Encomendas de novos navios a combustível alternativo, em junho 2024 [36]



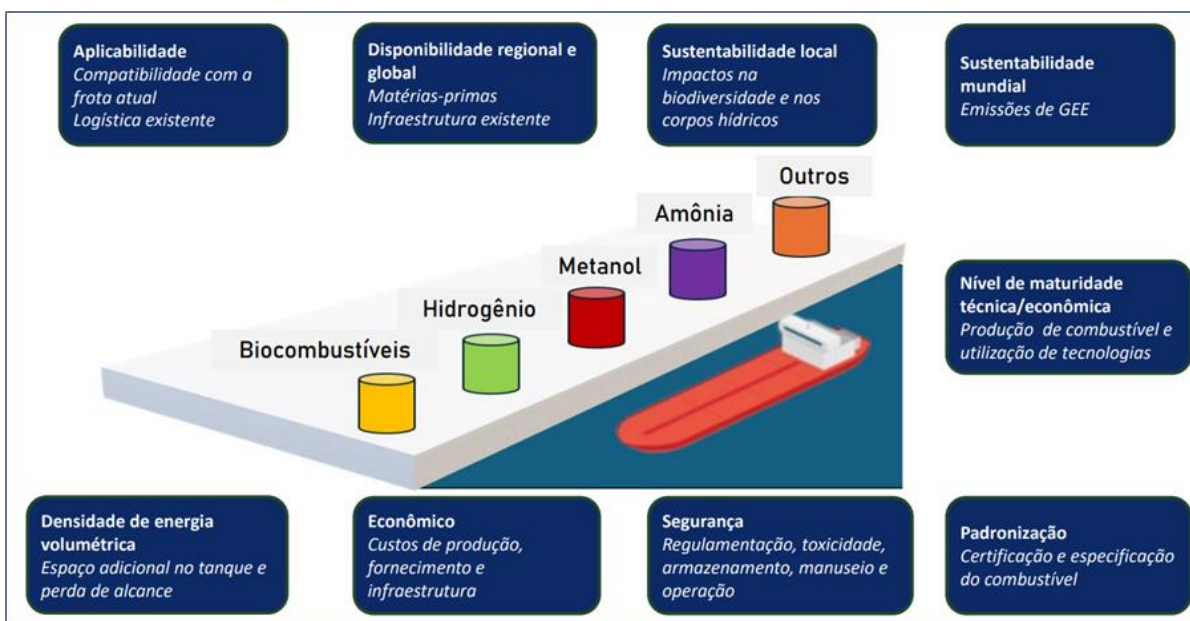
(a) por nº de navios; (b) por arqueação bruta (AB)

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 [36].

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 [36] [37].

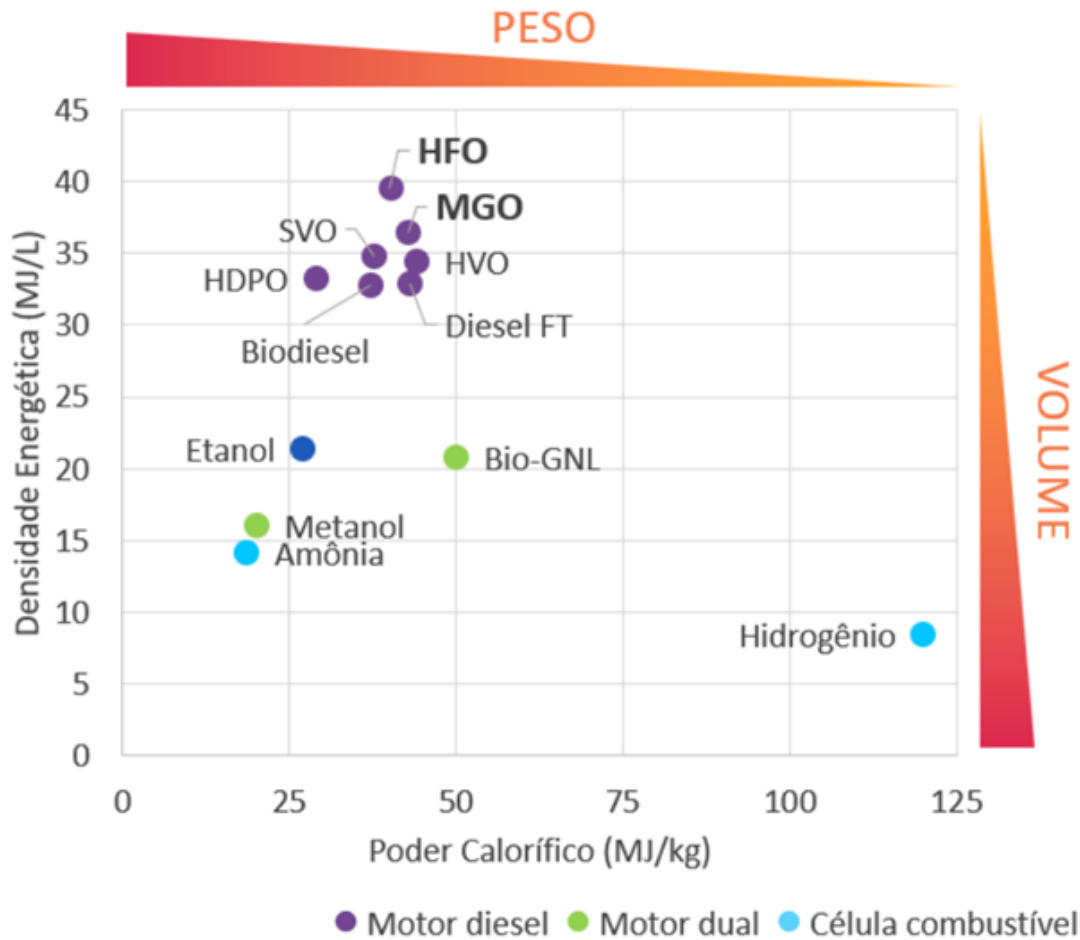
Todas as opções de combustíveis alternativos são acompanhadas de oportunidades e desafios, cuja viabilidade passa por uma análise minuciosa de diversos fatores, conforme pode ser visto na Figura 12.

Figura 12. 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 13 expressa com clareza, a influência que a densidade energética e o poder calorífico exercem sobre peso e volume dos combustíveis.

Figura 13. Influência da densidade energética e poder calorífico sobre os combustíveis [38]



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.

4.3.3.2 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 de longo curso, 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) bicomcombustível de baixa pressão – 4 a 2 tempos; (iii) bicomcombustível de alta pressão; (iv) turbina a gás [39].

4.1.3.2 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 [40].

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 [41].

4.1.3.3 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 CO_2 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 CO_2 (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 bicombustível⁴ [42]. Além disso, apresenta uma chama quase incolor, o que dificulta sua detecção e impede o uso de sistemas tradicionais de monitoramento de incêndio, tornando necessária a utilização de sistemas infravermelho de detecção, que são onerosos.

4.1.3.4 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 convencionais⁵. Durante a combustão, o H_2 tem a vantagem

⁴ 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 bicombustível, para se ter a ignição [42].

⁵ 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 [39].

de não liberar CO₂, material particulado (MP) e SO_x. 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, CO₂ e portadores de H₂ líquidos - LOHCs) e hidretos metálicos [39].

4.1.3.5 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 [43]. 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 [44].

4.1.3.6 Biocombustíveis

Como citado anteriormente, os biocombustíveis apresentam-se como uma alternativa relevante para o transporte aquaviário, incluindo 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) [36].

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 [36]. 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 [45], os biocombustíveis ou as suas misturas seriam ambas alternativas⁶ 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 de concorrência por parte de outros setores de transporte, cabendo destacar três aspectos, que merecem atenção:

- 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 biodiesel⁷ mais amplamente disponível na indústria e, recentemente, tem sido aplicado tanto em sua forma pura (B100)⁸ em navegações fluviais quanto em misturas com combustível marítimo, como o B24 comercializado pela Petrobras [46, 47]. Atualmente, FAME é o biocombustível mais utilizado em aplicações marítimas⁹ [36]. 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

⁶ 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 biocombustível 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) [143]. 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 [52].

⁷ A norma europeia que especifica o biodiesel (FAME) é a EN 14214.

⁸ A ASTM especifica o B100 por meio da norma ASTM D6751.

⁹ 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.

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 [44].

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 adicional¹⁰. Pode ser produzido por diversas rotas, sendo a de maior proeminência aquela a partir do óleo vegetal hydrogenado (HVO, na sigla em inglês), que converte gorduras ou óleos vegetais – sozinhos ou misturados com petróleo – em hidrocarbonetos, através de um processo conhecido como hidrotratamento de ácidos graxos. A sua alta densidade energética, 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 aeroviário, sendo este último um potencial competidor pelo uso das matérias-primas para obtenção de SAF (Sustainable Aviation Fuel) através da rota HEFA¹¹, mesma utilizada para obtenção de HVO [44]. 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*¹², 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. Comparado ao metanol, sua densidade é maior, sendo promissor ao ser utilizado de forma *drop-in* em motores a metanol *dual-fuel*. Embora sejam necessários cuidados com a segurança em função da corrosividade do etanol para alguns materiais, trata-

¹⁰ Pode -se citar como uma das normas internacionais que especifica o óleo diesel, independente de origem fóssil ou de biomassa, a ASTM D 975.

¹¹ Hydroprocessed Esters and Fatty Acids. Consiste no hidroprocessamento de ésteres e ácidos graxos para a produção de biocombustíveis, principalmente diesel verde e SAF.

¹² O uso automotivo é normatizado pela ASTM D4806.

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 diesel¹³, com vistas ao aprimoramento do número de cetano e de seu poder lubrificante [44, 48].

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 (CH₄). 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 [49]. 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 SO_x e NO_x se mantêm [48]. Os desafios estão relacionados ao espaço de armazenamento requerido, que precisam ser maiores do que os usados para os combustíveis destilados devido à menor densidade energética do biometano [44].

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

¹³ 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 [144].

no custo e no aumento de escala. Há testes realizados em escala piloto e de demonstração comercial [50, 44]. 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. [44].

4.1.3.7 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 NO_x , 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 ($-33,4^\circ\text{C}$ para amônia em comparação com $-252,9^\circ\text{C}$ 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 [39].

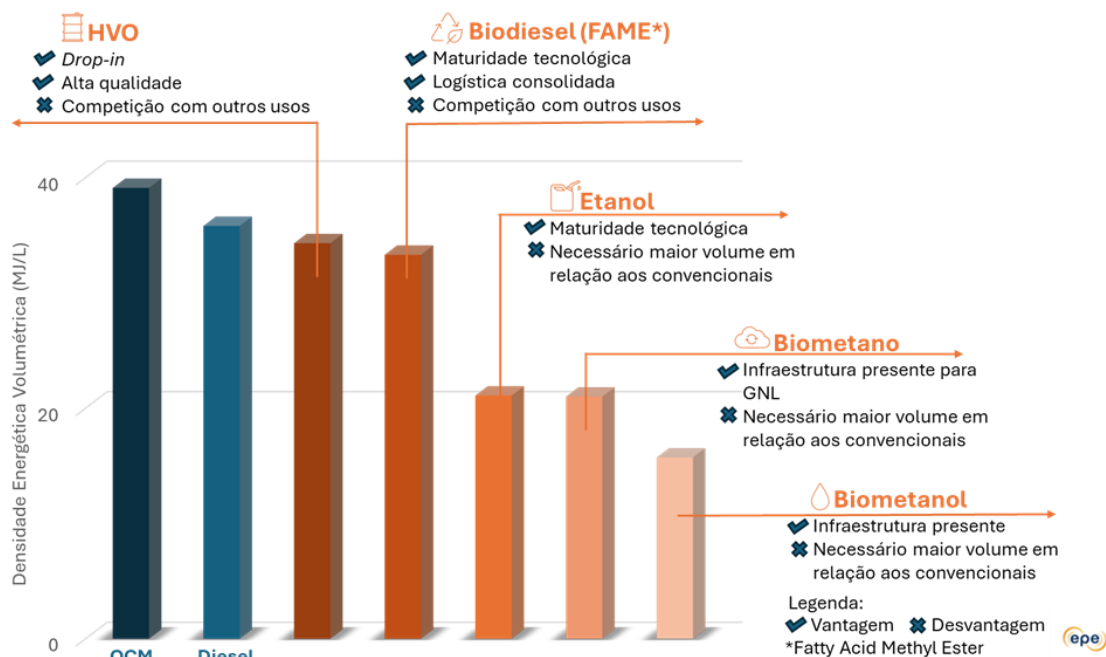
4.1.4 Desafios aos Combustíveis Alternativos

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 aquaviários e das organizações terrestres, e na indústria marítima e naval 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, biocombustíveis como biodiesel, diesel verde, etanol, biometanol e biometano apresentam maiores maturidade tecnológica e disponibilidade para o abastecimento de embarcações [36]. A Figura 14 apresenta uma comparação entre os combustíveis marítimos convencionais e biocombustíveis.

Figura 14. Densidade energética, vantagens e desvantagens entre os principais combustíveis convencionais e os biocombustíveis para uso no transporte marítimo [44] e [51]



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 aquaviário em águas portuárias, novas balsas de passageiros e navios de abastecimento totalmente elétricos (para 200 pessoas) foram implantadas em 2023 [52].

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 15.**

Figura 15. Notícias de uso de biocombustíveis parte de algumas empresas de comércio de combustível marítimo¹⁴.

The collage features several news articles:

- Vitol Introduces Dedicated Biofuel Bunker Barge in Singapore to Meet Demand:** Includes an image of the 'Marine Future' barge and text stating it is the first bunker barge able to deliver 100 percent bio-component fuels (Vitol). Published Feb 22, 2024.
- Everllence Confirms Successful Running of Ethanol-Fuelled Four-Stroke Engine:** A screenshot of the Everllence website showing a press release dated Tuesday, December 9, 2025, titled 'Testing confirms Everllence 21/31 as fuel-flexible platform'.
- Glomar claims 28% emissions reduction using GoodFuels' biofuel:** A screenshot of a news article dated February 23, 2024, by Fatima Bantia, reporting that Glomar Offshore has achieved a 28% CO2 emissions reduction by transitioning to GoodFuels' HVO30.
- World Fuel Services Unit Supplies Biofuel Blend in Gibraltar:** A screenshot of a LinkedIn post from the Ship & Bunker News Team, dated Wednesday, December 14, 2022, reporting that WFS subsidiary Gib Oil bunkered the Norwegian Cruise Line ship 'Seven Seas Splendor' with a renewable diesel blend in Gibraltar on October 14.
- Exploring Ethanol: New Fuel Trial to Start on Laura Mærsk:** A screenshot of a news article with a summary stating: 'Maersk continues to explore options to diversify its low-emission fuel portfolio by testing ethanol in a dual-fuel methanol engine.'

No Brasil, também se observam iniciativas¹⁵ de inclusão de biocombustíveis nas misturas com bunker para uso nas embarcações em dezembro de 2023, a Petrobras iniciou testes com misturas de bunker com 24% de biodiesel de matéria-prima residual (sebo) (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). 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 bioprodutos mais sustentáveis [53].

¹⁴ Figura original da Nota Técnica da EPE com atualizações para contemplar os avanços recentes

¹⁵ 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 [136].

Em julho de 2024, a Petrobras, recebeu autorização da ANP, para comercializar óleo combustível marítimo (bunker) com 24% de biodiesel (B24) [54]. 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. 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 [55].

Em novembro de 2023, a Vale, em parceria com a Oldendorff Carriers, iniciou sua primeira viagem com biocombustível (B24) em um navio minareiro Newcastlemax (Figura 16). 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 (CO₂eq) no ciclo de vida do combustível (well to wake) é de cerca de 18%, ou cerca de 785 toneladas de CO₂eq. 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) [56].

Figura 16. Anúncios de abastecimento de navios com mistura bunker + B24 [53] [56]



(a) Teste Petrobras (b) Teste Vale

Desde outubro de 2025, a Maersk tem testado o uso do etanol brasileiro em um motor a metanol, em viagens do navio Laura Maersk pela Europa. Os testes do blend 10% de etanol (E10) com 90% de metanol apresentaram bons resultados quanto a segurança, combustão, lubricidade e indicadores de corrosividade, e integridade efetiva do blend de combustíveis foram concluídos. Os testes com a mistura E50 estão em andamento e a empresa pretende conduzir testes usando E100. Na Dinamarca, a Ellerlence (formalmente *Man Energy Solutions*) confirmou o funcionamento bem-sucedido com etanol em todos os níveis de carga do seu motor bicomcombustível 4 tempos, movido a metanol. A empresa também tem feito testes no Japão com outros de seus motores. Além dessas empresas, Wärtsillä prevê realização de testes com etanol em seus motores em 2026, e HD Hyundai também validou o uso de etanol em seus motores *dual-fuel* com resultados positivos na Coreia do Sul. A Companhia Brasileira de Offshore (CBO) e Caterpillar/MaK fecharam acordo para realizar a conversão de um motor de grande porte para operar com o sistema *dual-fuel* diesel/etanol, prevendo 35% a 40% de etanol na mistura, com previsão para entrar em operação em 2027.

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 ECAS¹⁶ (Áreas de Controle de Emissões) e áreas globais;
- Inclusão de especificações para embarcações que utilizam *scrubbers*¹⁷;

¹⁶ Em inglês, *Emission Control Area – ECA*. São designadas para diminuir as 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* [137].

¹⁷ 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 [137].

- 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.

4.1.5 Outras Iniciativas de Descarbonização do Transporte Marítimo

4.1.5.1 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 [57] por meio de seu uso e expansão de sua infraestrutura de abastecimento [58].

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 [36] [57]:

- 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;
- 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 17.

Figura 17. Principais fases para a implementação de corredores marítimos verdes [57]

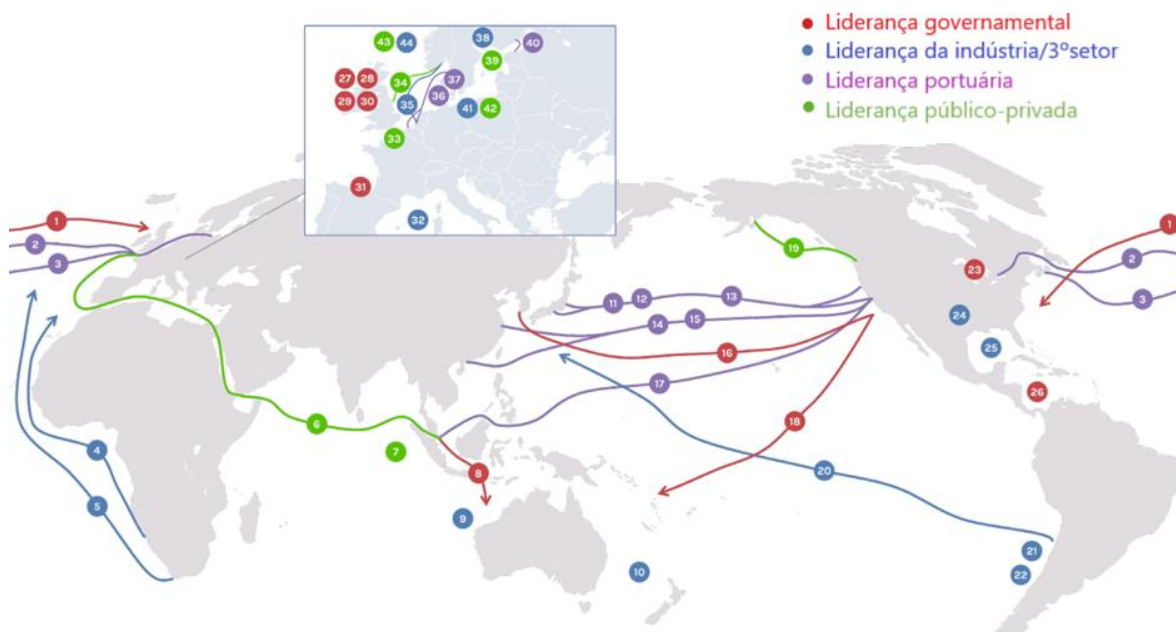


Um conceito de corredor marítimo verde envolve um ecossistema de muitos intervenientes, tais como proprietários e afretadores de carga, portos, armadores e operadores, fornecedores de energia, instituições financeiras, autoridades e outros agentes envolvidos na atividade do setor marítimo.

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 Clydebank¹⁸, na qual mais de 20 países se comprometeram em desenvolver pelo menos seis corredores marítimos verdes até 2025, e muitos mais até 2030 [36]. 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 [59]. Uma visão geral dos 44 corredores de navegação verdes (todos em fase inicial de planejamento) anunciados em 2023, pode ser visto na Figura 18. 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) [57], de acordo com Figura 18.

¹⁸ 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 [36].

Figura 18. Iniciativas anunciadas de corredores marítimos verdes, em 2023 [57]



1-Força-tarefa EUA-Reino Unido	16-República da Coreia-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 (Piscicultura)	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 Nórdico
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	

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 graneis 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) [57].

Os portos de Antuérpia-Bruges, Hamburgo, Roterdã e Singapura pretendem posicionar-se como centros de abastecimento multicomcombustível. 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 [60], 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 [61].

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 memorando¹⁹ 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 [62].

Além dessa iniciativa, o Ministério de Portos e Aeroportos e as Autoridades Portuárias vêm intensificando suas agendas internacionais para promover a implantação de “corredores verdes marítimos”, com foco na promoção da transição energética do uso de combustíveis de baixo carbono. Foram assinados ou estão em tratativas para serem assinados Memorandos de Entendimento ou Declarações de Intenções com Noruega, França, Singapura, China, Bélgica, Espanha, Canal do Panamá e com os países do Mercosul.

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




¹⁹ 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 [62].


abordagem participativa, proativa e sistêmica para conceber e implementar políticas [63].

4.1.5.2 Frentes e Iniciativas Privadas

Além dos corredores verdes, segundo a IEA [64], 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 6 reúne algumas das frentes e iniciativas.

Quadro 6. Iniciativas privadas para descarbonização do transporte marítimo [64]; [65]; [66]; [67]

	<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>
	<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 sozinho. ZEMBA é uma iniciativa dos Proprietários de Carga para Embarcações de Emissão Zero (coZEV).</p>
	<p>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,</p>

	alimentados por combustíveis com emissões zero, rumo à descarbonização total até 2050.
	<p>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.</p>

4.1.5.3 Eficiência Operacional

Como medidas de eficiência operacional, podem ser citadas a otimização do trim²⁰ e lastro²¹ 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 [36]. 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,

²⁰ 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.

²¹ O lastro é aplicado para dar estabilidade e flutuação à embarcação, especialmente quando ela não está totalmente carregada.

devido às dificuldades ou aos elevados custos de modernização de navios existentes [36].

Nesse contexto, a Organização Marítima Internacional (IMO) tem desempenhado um papel fundamental na promoção da eficiência energética e na descarbonização do transporte marítimo, por meio do estabelecimento de regulamentações globais que incentivam a adoção de medidas técnicas e operacionais. Entre as principais iniciativas destaca-se o Índice de Projeto de Eficiência Energética (EEDI), implementado em 2013, que estabelece requisitos mínimos de eficiência energética para novos navios, promovendo desde a fase de projeto o desenvolvimento de embarcações mais eficientes e com menor intensidade de emissões. Complementarmente, o Plano de Gerenciamento de Eficiência Energética do Navio (SEEMP), também obrigatório desde 2013, exige que todos os navios adotem planos específicos voltados à melhoria contínua da eficiência energética operacional, com base em boas práticas de gestão [68].

Mais recentemente, a IMO ampliou o escopo regulatório para navios existentes por meio do Índice de Eficiência Energética para Navios Existentes (EEXI), em vigor desde 2023, que impõe limites mínimos de eficiência energética, incentivando a implementação de ajustes técnicos ou operacionais para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Adicionalmente, o Indicador de Intensidade de Carbono (CII), também implementado em 2023, classifica os navios de acordo com sua intensidade de carbono por tonelada-milha transportada, estimulando melhorias contínuas na eficiência energética operacional ao longo da vida útil da embarcação [69].

Para atender aos requisitos estabelecidos pela IMO, os armadores têm adotado uma série de medidas técnicas e operacionais, tais como a otimização do design do casco e da hélice, a recuperação de calor residual gerado pelos motores principais, a utilização de sistemas de propulsão assistida pelo vento (como velas rotativas ou pipas), a otimização de rotas com base em dados meteorológicos, a redução de velocidade (*slow steaming*), entre outras estratégias voltadas à melhoria da eficiência energética e à mitigação das emissões no transporte marítimo [70].

4.1.5.4 Atuação dos Portos na Descarbonização do Transporte Aquaviário

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 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 [71]. Neste sentido, os portos podem facilitar a descarbonização do transporte aquaviário, incluindo o transporte marítimo, através da adoção de medidas técnicas e operacionais na interface navio-porto, dentre as quais:

- i. fornecimento de energia de 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 biocombustível, 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) por meio da utilização de troca eletrônica de dados, colaboração e compartilhamento de informações (PortCDM – Port Collaborative Decision Making) 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.

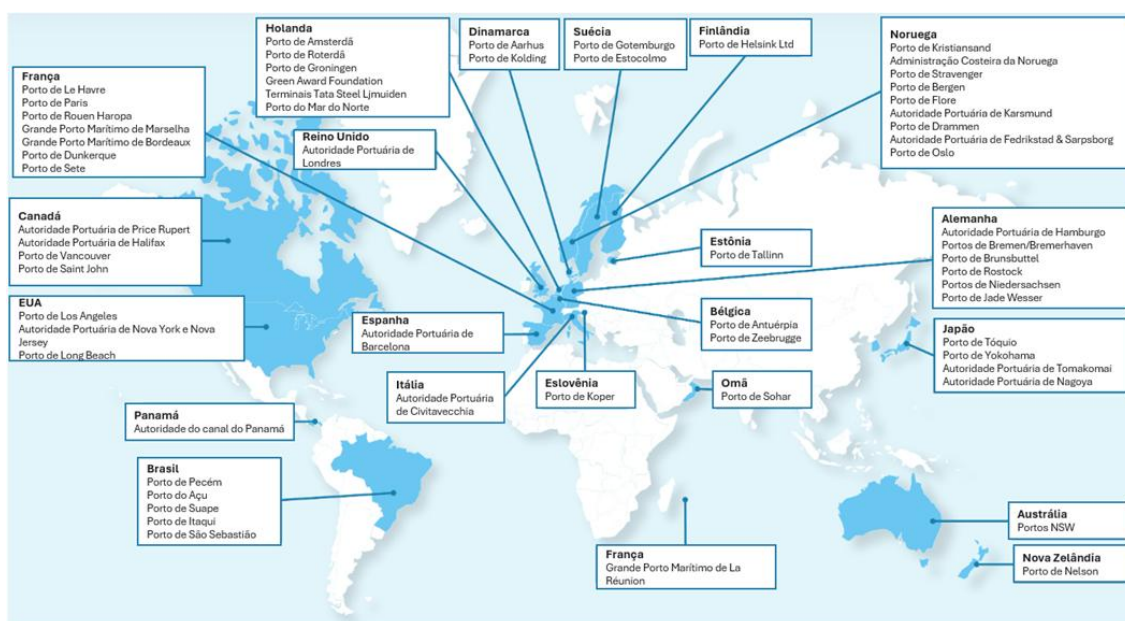
Do outro lado do espectro, as autoridades portuárias, ao reconhecerem as externalidades ambientais nas suas operações e logística, podem implementar várias medidas e políticas para reduzir as emissões. O porto e as autoridades públicas (governo federal, estadual e municipal) podem utilizar ferramentas políticas e de gestão para reduzir as emissões de GEE do transporte aquaviário, entre outros poluentes, na área portuária e fora dela [71]. 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 [60].

A implementação de políticas, como incentivos, é um passo vital para a descarbonização do transporte aquaviário. 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 embarcações. Considerando o papel que os portos desempenham na descarbonização das embarcações, 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 [72]. 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 [71]. No Brasil fazem parte os portos de Pecém, Açú, Suape, Itaquí e São Sebastião conforme Figura 19.

Figura 19. Portos participantes do regime de incentivo ESI para navios [73]



Também no Brasil, em uma iniciativa liderada²² pelo Porto do Itaquí, 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 [74]. A Aliança é inspirada na *Alianza Net Zero Mar* - associação espanhola, sem fim lucrativos, tendo como objetivo acelerar a descarbonização e eletrificação do

²² O Porto do Itaquí 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 de Itaquí, 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 [138].

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 [75]. 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 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*” [76]. Outro programa importante para melhorar 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*” [77].

Outra iniciativa importante é programa Navegue Simples que busca modernizar e simplificar os processos de navegação e atracação portuária no Brasil. A iniciativa visa reduzir a burocracia, melhorar a eficiência operacional e fortalecer a integração

digital no setor marítimo. Com a adoção de novas tecnologias, o programa busca acelerar processos administrativos, tornando-os mais ágeis, seguros, eficientes e transparentes. A iniciativa fortalece a competitividade do comércio marítimo brasileiro e impulsiona o desenvolvimento sustentável da infraestrutura portuária do país. 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. 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.

4.1.6 Trajetórias para o Transporte Aquaviário Brasileiro

No horizonte dos estudos da EPE (PDE²³ e PNE²⁴) o atendimento da demanda por combustível aquaviário (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 16°S) 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 aquaviário 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

²³ Plano Decenal de Expansão de Energia [25]

²⁴ Plano Nacional de Energia [140]

alternativa relevante, pois a indústria de biocombustíveis encontra-se bem estabelecida.

4.1.6.1 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 [27], e de abastecimentos de embarcações a partir de dados do Balanço Energético Nacional (BEN) [78] [79], conforme ilustrada na Figura 20.

Figura 20. 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.

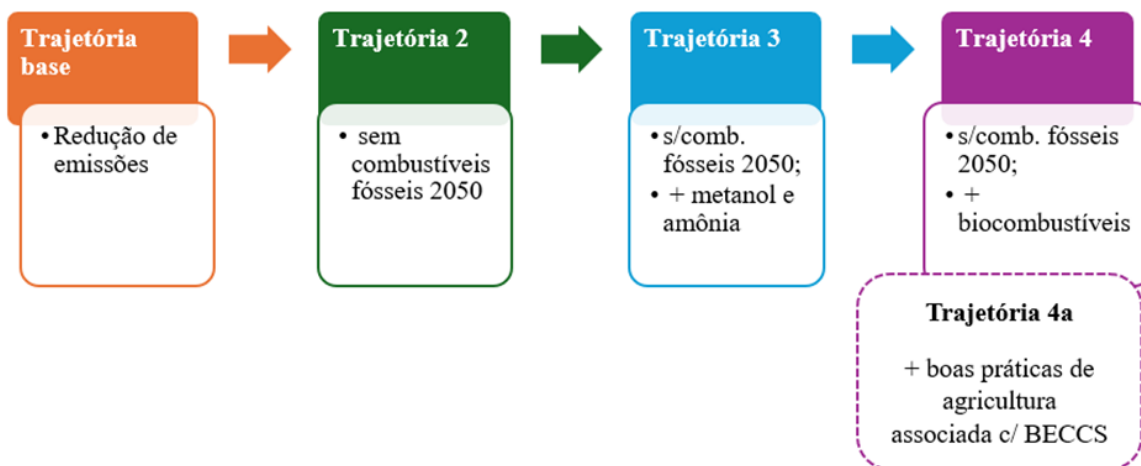
O exercício das trajetórias foi baseado nas premissas do PDE 2034, e estendido a partir das discussões preliminares de cenários para o PNE 2055. Utilizou como insumo diferentes planos de longo prazo de diferentes ministérios e órgãos públicos, além de contato com instituições públicas e privadas para 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 21 – 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.

Vale ressaltar que, para o segmento de apoio portuário e apoio marítimo, as trajetórias de descarbonização apresentam especificidades operacionais que diferenciam esse conjunto de embarcações dos demais segmentos da navegação. Em razão do perfil de operação predominantemente local ou regional, da elevada frequência de atracação [80] da potência instalada relativamente elevada em relação ao tempo efetivo de navegação e das restrições de espaço, segurança e custo, não se vislumbra, no horizonte analisado, a adoção relevante de combustíveis como metanol, amônia ou hidrogênio. Assim, as trajetórias para esse segmento priorizam a combinação de hibridização, eletrificação parcial e uso de biocombustíveis compatíveis com a frota existente.

Figura 21. Trajetórias de atendimento da demanda por combustíveis marítimos de baixa emissão (combustíveis alternativos)



4.1.6.2 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 22).

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.

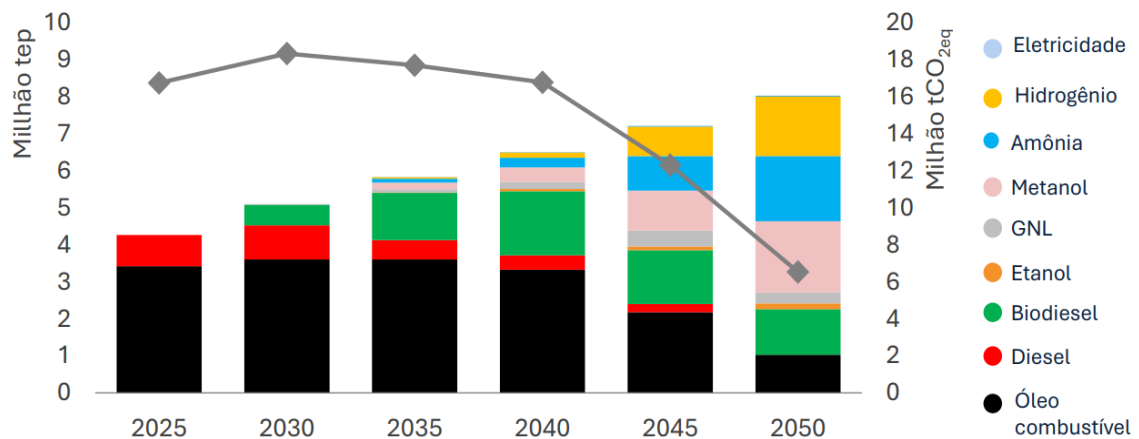
No longo curso, o biodiesel será usado no curto prazo, enquanto o GNL será a opção de médio prazo. Embarcações de grande porte, previstas para serem entregues a partir de 2034, também passarão a adotar combustíveis alternativos com destaque para metanol, amônia e hidrogênio. Esta trajetória considera o uso de bunker, com uma mistura de 30% de biodiesel e 70% de óleo combustível.

No segmento de apoio portuário e apoio marítimo, a trajetória base considera a manutenção do uso de combustíveis convencionais nos curto e médio prazos, com introdução gradual de misturas de biodiesel. A hibridização das embarcações, por meio de sistemas diesel-elétricos com bancos de baterias, ocorre principalmente em novas construções e retrofits selecionados, resultando em ganhos de eficiência energética e redução de emissões.

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



4.1.6.3 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 23).

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 prescindir de combustíveis fósseis. A hibridização aumentará no transporte de passageiros em algumas cidades onde a eletrificação ainda é desafiadora.

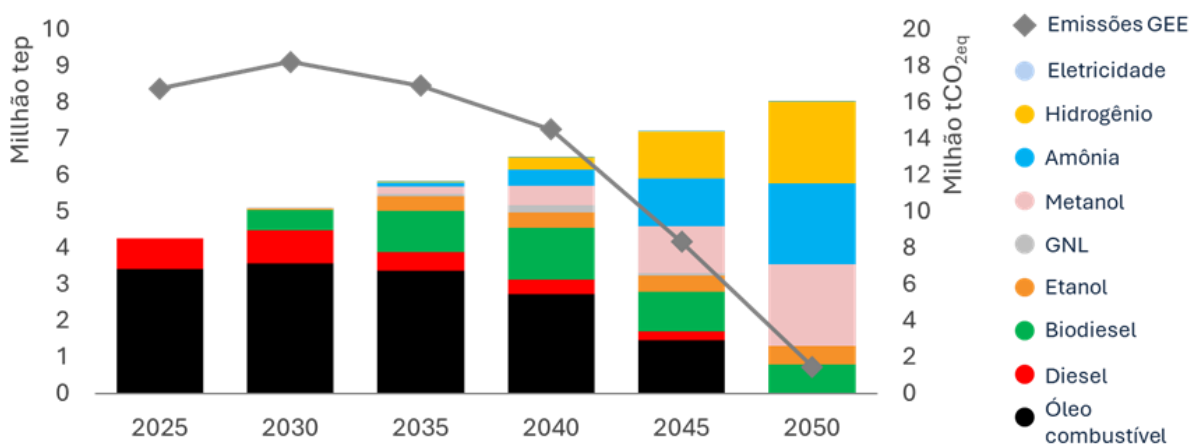
Na cabotagem, a mistura de biodiesel no bunker começará em 2026, com o objetivo de atingir 30% em 2038. Além disso, novas embarcações de grande porte, entregues a partir de 2034, utilizarão combustíveis alternativos, como etanol, metanol, amônia e hidrogênio. A combinação dessas alternativas permite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

Nesta trajetória, o segmento de apoio portuário e apoio marítimo avança progressivamente para a eliminação dos combustíveis fósseis até 2050, com base na ampla adoção de biocombustíveis, como biodiesel e diesel verde, associados à hibridização das embarcações. A eletrificação parcial assume papel relevante, especialmente em operações portuárias e de curta duração, permitindo a substituição do combustível fóssil sem a necessidade de introdução de novos combustíveis ou de maior complexidade operacional.

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



4.1.6.4 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 24). 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.

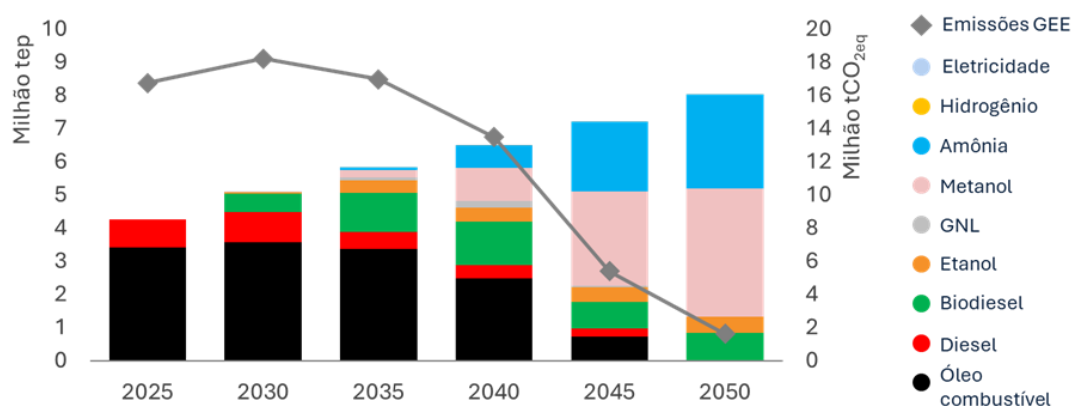
Na cabotagem, o biodiesel permitirá que o segmento reduza suas emissões rapidamente no curto prazo. No entanto, ao invés de depender de diversos combustíveis diferentes, a cabotagem no Brasil irá se concentrar no uso do metanol e etanol, por sua maior viabilidade em embarcações de porte significativo 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.

Nesta trajetória, a descarbonização do apoio portuário e apoio marítimo é fortemente baseada na hibridização das embarcações e na eletrificação parcial das operações, especialmente em áreas portuárias. O uso de biocombustíveis complementa a estratégia, permitindo a eliminação dos combustíveis fósseis até 2050, com maior eficiência energética e redução da demanda total por combustível.

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



4.1.6.5 Trajetória 4 – Sem Combustíveis Fósseis em 2050 – Priorizando Biocombustíveis

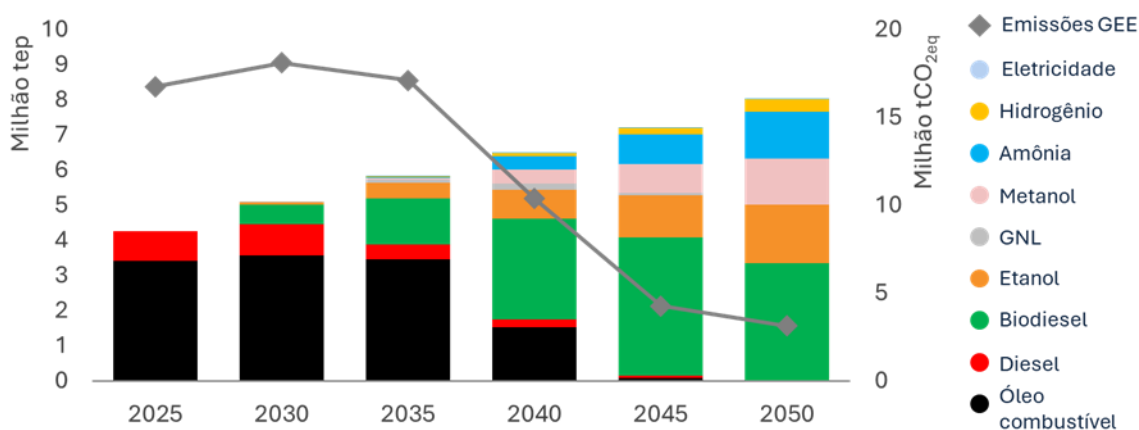
A trajetória 4 foi elaborada com o intuito de demonstrar o potencial de descarbonização do Brasil utilizando um diferencial estratégico e competitivo do País: os biocombustíveis (Figura 25).

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.

Nesta trajetória, o apoio portuário e apoio marítimo baseia sua descarbonização majoritariamente no uso de biocombustíveis, com destaque para o biodiesel e o diesel verde, aproveitando a elevada compatibilidade com a frota existente. De forma complementar e em menor escala, considera-se a utilização do etanol em aplicações específicas e condicionadas à viabilidade técnica e operacional, contribuindo para a diversificação das rotas de descarbonização do segmento. A hibridização das embarcações e a eletrificação parcial em operações portuárias complementam a estratégia, permitindo a eliminação dos combustíveis fósseis até 2050, com menor necessidade de novas infraestruturas de abastecimento.

Figura 25. Evolução do consumo energético e das emissões do transporte aquaviário na trajetória 4 - Sem combustíveis fósseis em 2050, priorizando biocombustíveis

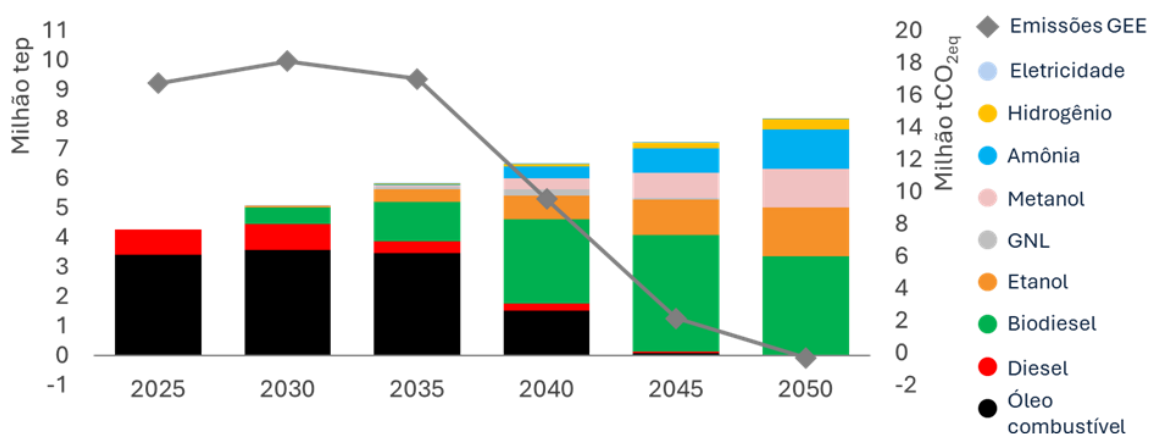


No entanto, é possível reduzir as emissões dos biocombustíveis brasileiros de forma ainda mais significativa, com atingimento de um balanço de emissões do etanol negativo (**Figura 26**). Isso pode ser alcançado a partir do uso de biocombustíveis tradicionais cultivados com a aplicação das melhores práticas 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 26. 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. O **Quadro 7** apresenta uma síntese comparativa das trajetórias propostas para o período 2024 - 2050.

Quadro 7. Consolidação das trajetórias projetadas

Trajetória	Uso de combustíveis	Navegação interior	Cabotagem	Longo curso	Apoio portuário e apoio marítimo	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)	Uso de diesel marítimo com introdução gradual de biodiesel e hibridização pontual das embarcações.	61%
2	Sem combustíveis fósseis em 2050	Gradual substituição de óleo diesel marítimo por biodiesel e etanol, atingindo 90% e 10% 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)	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 e amônia)	Substituição progressiva por biocombustíveis, com hibridização e eletrificação parcial das operações.	91%
3	Sem combustíveis fósseis em 2050, priorizando metanol e amônia	Gradual substituição de óleo diesel marítimo por biodiesel e etanol, atingindo 90% e 10% 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)	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 e amônia)	Ênfase em hibridização e eletrificação parcial, com uso complementar de biocombustíveis.	90%
4	Sem combustíveis fósseis em 2050, priorizando biocombustíveis	Gradual substituição de óleo diesel marítimo por biodiesel e etanol, atingindo 80% e 20% em 2050	Gradual substituição do 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	Predominância de biodiesel e diesel verde, com uso em menor escala de etanol e apoio da hibridização.	81%
4a	Sem combustíveis fósseis em 2050, priorizando biocombustíveis + boas práticas na agricultura e BECCS (a partir de 2034)	Gradual substituição de óleo diesel marítimo por biodiesel e etanol, atingindo 80% e 20% em 2050	Gradual substituição do 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	Ampliação do uso de biocombustíveis, potencializando ganhos de eficiência e reduções adicionais de emissões.	102%

4.2 Da consulta aos postos diplomáticos

A consulta realizada junto aos postos diplomáticos contou com a participação de países de diferentes regiões, com maior concentração de contribuições provenientes da Europa e da Ásia, refletindo o estágio mais avançado dessas regiões na agenda de descarbonização do transporte marítimo. Nas Américas, registrou-se participação pontual, notadamente dos Estados Unidos, cujas contribuições complementam a análise sob a perspectiva de um grande mercado marítimo e energético. Houve ainda contribuições de países em diferentes estágios de maturidade institucional, o que enriquece o caráter comparativo do levantamento.

Com exceção da Nigéria, que se manifestou apenas sobre o posicionamento nos debates da Organização Marítima Internacional (IMO relativos aos mecanismos técnicos de mensuração da descarbonização), do Japão, que não apresentou informações sobre a regulamentação dos combustíveis sustentáveis de navegação, e do Reino Unido, que não respondeu quanto ao seu posicionamento nos debates da IMO, os demais países analisados forneceram respostas completas às duas questões do questionário.

Para orientar a consulta e facilitar a comparação entre os países, as informações recebidas dos postos diplomáticos foram organizadas de acordo com as oito perguntas originalmente formuladas. A seguir, apresenta-se a sistematização do conteúdo, agrupada por pergunta.

4.2.1 Qual posição do país nos debates na Organização Marítima Internacional (IMO), quanto aos mecanismos técnicos para mensuração da descarbonização?

A posição dos países nos debates da Organização Marítima Internacional (IMO) acerca dos mecanismos técnicos para mensuração da descarbonização do transporte marítimo reflete diferentes níveis de compromisso climático, capacidade tecnológica, estrutura produtiva e prioridades econômicas

Países tecnologicamente avançados e com forte inserção no setor marítimo, como Alemanha, Noruega, Suécia e Japão, tendem a apoiar a adoção de diretrizes baseadas na Avaliação do Ciclo de Vida dos combustíveis (Life Cycle Assessment – LCA), a implementação de sistemas robustos de certificação de sustentabilidade, a

promoção de combustíveis zero e quase zero (ZNZ) e o monitoramento de emissões fugitivas, com destaque para o metano.

Esses países defendem ainda a padronização internacional dos critérios de mensuração, de modo a assegurar comparabilidade, integridade ambiental e previsibilidade regulatória, reduzindo distorções competitivas no comércio marítimo global. De forma geral, essa posição está associada à maior disponibilidade de infraestrutura, capacidade industrial e acesso a tecnologias avançadas.

Por outro lado, países em desenvolvimento, como Nigéria e Índia, enfatizam nos debates da IMO a necessidade de que os mecanismos técnicos de mensuração sejam aplicados respeitando critérios de justiça, gradualidade e viabilidade econômica, levando em conta as assimetrias existentes entre países quanto ao acesso a tecnologias, financiamento e combustíveis sustentáveis. Esses países defendem abordagens que conciliem ambição ambiental com os princípios de equidade e transição energética justa, evitando impactos desproporcionais sobre economias com menor capacidade institucional e logística.

Os Estados membros da União Europeia, em geral, alinham suas posições às diretrizes e compromissos regionais, buscando refletir no âmbito da IMO os avanços normativos já consolidados no bloco. Em contraste, alguns países, como os Estados Unidos, adotaram uma postura contrária ao IMO Net-Zero Framework, rejeitando a criação de mecanismos globais de precificação de carbono no transporte marítimo por considerá-los economicamente prejudiciais e equivalentes a um “imposto global”. Essa oposição incluiu pressão diplomática e contribuiu para o adiamento da decisão sobre a adoção formal do Framework na IMO para outubro de 2026 de precificação de carbono ou a restrições mandatórias sobre combustíveis, privilegiando abordagens baseadas em incentivos e inovação tecnológica [81].

4.2.2 O país possui políticas públicas voltadas para os combustíveis sustentáveis de navegação e/ou para redução de emissões no setor aquaviário?

Os dados indicam a existência de um esforço global crescente para a descarbonização do transporte marítimo, por meio da adoção de políticas públicas que combinam planejamento estratégico, incentivos econômicos, regulação, desenvolvimento de infraestrutura, pesquisa e inovação, produção doméstica de combustíveis limpos e mecanismos de certificação e rastreabilidade.

Na Europa, destacam-se iniciativas como o Plano Nacional de Energia e Clima da Grécia (NECP 2023), alinhado a instrumentos como o FuelEU Maritime e a inclusão do transporte marítimo no EU Emissions Trading System (ETS), além de programas específicos como o Port Electrification Program e o Green Shipping Fund. A Alemanha concentra esforços em pesquisa e inovação, por meio do programa MARITIME.zeroGHG, com foco em hidrogênio verde, combustíveis sintéticos e retrofits de frotas, além de incentivos fiscais a soluções Power-to-X e critérios rigorosos de sustentabilidade para biocombustíveis.

Países como Finlândia e Portugal adotam abordagens integradas, combinando eletrificação portuária, incentivos fiscais, metas de bunkering de combustíveis alternativos e programas de modernização da frota. No contexto asiático, Coreia do Sul, Singapura, Japão e Índia implementam estratégias nacionais voltadas à construção de embarcações verdes, ao uso de combustíveis alternativos e à criação de ambientes regulatórios e financeiros favoráveis. Em países emergentes, observa-se uma estratégia gradual, articulando políticas, infraestrutura e adoção escalonada de combustíveis sustentáveis.

De maneira consolidada, as políticas públicas identificadas concentram-se em orientar a transição energética do transporte marítimo por meio de estratégias nacionais, programas de apoio, incentivos econômicos e investimentos públicos, criando as condições necessárias para a redução de emissões e a adoção futura de combustíveis e tecnologias de baixo carbono, enquanto os aspectos estritamente regulatórios e normativos são tratados especificamente na Pergunta 3.

4.2.3 Como funciona a regulamentação dos combustíveis sustentáveis de navegação dos países? Há regulação e/ou normatização para esses combustíveis visando ao uso marítimo?

A regulamentação dos combustíveis sustentáveis de navegação varia significativamente entre os países consultados, mas evidencia uma tendência clara de convergência em torno de marcos internacionais, especialmente aqueles estabelecidos pela Organização Marítima Internacional (IMO) e, no caso europeu, pela União Europeia. De modo geral, observa-se a priorização de metas de redução da intensidade de emissões de gases de efeito estufa ao longo de todo o ciclo de vida

dos combustíveis (“well-to-wake”), em detrimento da imposição de mandatos volumétricos rígidos de mistura.

Na Europa, países como Alemanha, Grécia, Finlândia, Portugal e Reino Unido aplicam instrumentos regulatórios estruturados, como o FuelEU Maritime, a Diretiva de Energia Renovável (RED II/III) e, em alguns casos, sistemas de comércio de emissões. Esses marcos normativos estabelecem critérios de desempenho ambiental, exigências de certificação de sustentabilidade e metas progressivas de descarbonização, criando um ambiente regulatório favorável à adoção de biocombustíveis avançados, e-fuels, metanol verde, amônia e hidrogênio verde. O GNL é reconhecido, em alguns casos, como combustível de transição, dentro de uma lógica regulatória gradual.

Nos países asiáticos, como Índia, Coreia do Sul, China e Singapura, observa-se a adoção de normas específicas para blends, requisitos de certificação de sustentabilidade e instrumentos regulatórios voltados à promoção de combustíveis alternativos, incluindo biocombustíveis, metanol, amônia, hidrogênio e GNL. Esses países combinam regulamentação, incentivos e planejamento estratégico, com diferentes graus de maturidade normativa e institucional.

Nos Estados Unidos, prevalece uma abordagem regulatória baseada em incentivos econômicos, programas de pesquisa, desenvolvimento e inovação e parcerias estratégicas, sem a adoção de mandatos obrigatórios de mistura para o setor marítimo. Já países como a África do Sul encontram-se em estágio inicial, com roadmaps de descarbonização ainda em desenvolvimento e ausência de regulamentação específica plenamente implementada.

O levantamento também evidencia diversidade nos arranjos institucionais responsáveis pela regulação, que podem envolver ministérios de transportes, energia e meio ambiente, agências reguladoras e autoridades marítimas nacionais. Essa multiplicidade reflete diferentes modelos de governança do setor aquaviário e energético, mas não impede a convergência gradual em torno de princípios comuns.

A partir das contribuições dos países participantes, nota-se que os aspectos relevantes das políticas públicas incluem:

- I. Integração de planejamento estratégico com metas de descarbonização e conformidade com compromissos e normas internacionais;

II. Adoção de incentivos econômicos e fiscais capazes de reduzir o custo de implementação de combustíveis e tecnologias limpas;

III. Estabelecimento de regulamentação e sistemas de certificação de sustentabilidade, assegurando redução efetiva de emissões ao longo do ciclo de vida dos combustíveis;

IV. Desenvolvimento e modernização da infraestrutura portuária, com destaque para eletrificação, shore power e bunkering de combustíveis alternativos;

V. Promoção da inovação tecnológica e de atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PDI), com foco em combustíveis avançados, hidrogênio verde e retrofit de frotas.

VI. Estímulo à produção nacional de combustíveis limpos, fomentando mercados internos e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis importados.

VII. Adoção de uma abordagem multissetorial e tecnologicamente neutra, permitindo a coexistência de biocombustíveis, hidrogênio, amônia e eletrificação, garantindo flexibilidade e escalabilidade à transição energética.

Em síntese, a regulamentação dos combustíveis sustentáveis de navegação reflete uma abordagem gradual, tecnológica e institucionalmente diferenciada, mas orientada por princípios comuns de sustentabilidade, mensuração de emissões e alinhamento internacional, consolidando as bases normativas para a descarbonização do transporte marítimo em escala global.

4.2.4 Como funciona a logística de abastecimento do mercado de combustíveis sustentáveis de navegação no país, se aplicável? Quais os principais combustíveis sustentáveis de navegação utilizados?

Verifica-se, a partir das contribuições dos postos diplomáticos, que a logística de produção, distribuição e abastecimento de combustíveis sustentáveis de navegação apresenta elevada heterogeneidade entre os países, refletindo diferenças de capacidade industrial, disponibilidade de matérias-primas, posicionamento geográfico e maturidade das políticas públicas. De modo geral, observa-se uma concentração da produção e da infraestrutura logística em países do Norte e do Oeste da Europa, na Ásia Oriental e na América do Norte, enquanto países do Sul da Europa, África e parte da Ásia permanecem majoritariamente dependentes de importações.

Na Europa Setentrional, países como Finlândia, Suécia e Noruega dispõem de cadeias logísticas consolidadas, com produção doméstica relevante de biocombustíveis avançados (como HVO, biodiesel e biogás), Bio-GNL e eletricidade para uso portuário, além de redes estruturadas de bunkering e sistemas de Onshore Power Supply (OPS). Empresas como Neste, Gasum, Preem e Lantmännen desempenham papel central tanto no atendimento aos mercados internos quanto na exportação para outros países europeus, sobretudo no contexto regional nórdico.

Na Europa Central e Ocidental, Alemanha e Reino Unido contam com infraestrutura em expansão e produção relevante de biometano, metanol e biodiesel. No entanto, adotam uma postura relativamente cautelosa quanto ao uso de biocombustíveis no transporte marítimo, defendendo explicitamente que sua origem seja comprovadamente sustentável e que haja priorização de resíduos e materiais residuais como matérias-primas.

Essas iniciativas estão associadas a estratégias industriais estruturadas e a projetos de Power-to-X, voltados à produção de combustíveis sintéticos de baixo carbono. Ambos os países atuam simultaneamente como produtores, consumidores e exportadores de combustíveis sustentáveis, atendendo majoritariamente aos mercados europeus. A logística desses combustíveis baseia-se na integração entre portos, indústrias químicas, refinarias adaptadas e cadeias energéticas nacionais, o que favorece eficiência e escala na transição energética.

Em contraste, no Sul e Leste da Europa, países como Grécia, Portugal e Eslovênia ainda apresentam produção doméstica limitada ou inexistente de combustíveis sustentáveis de navegação. A Grécia conta com terminais de GNL e iniciativas emergentes em biocombustíveis e metanol, mas depende majoritariamente de importações. Portugal concentra sua logística no Terminal de Sines, com forte dependência de GNL importado e ausência de produção nacional de Sustainable Marine Fuels. A Eslovênia, por sua vez, encontra-se em fase piloto para hidrogênio, amônia e biodiesel, dependendo quase integralmente de fornecedores regionais. Nesses casos, o mercado é predominantemente importador, com abastecimento voltado a rotas intraeuropeias e internacionais.

Na Ásia, a logística é fortemente centralizada em hubs portuários estratégicos. A Coreia do Sul desenvolveu infraestrutura robusta de bunkering em portos como Ulsan e Busan, com foco em GNL, metanol e amônia, apoiada por investimentos

estatais. A China possui ampla capacidade produtiva de LNG, biodiesel e amônia verde, com terminais de abastecimento e vocação exportadora, atendendo principalmente mercados asiáticos e europeus. Singapura atua como hub global de bunkering, importando matérias-primas para biocombustíveis (como óleo de cozinha usado) e redistribuindo combustíveis sustentáveis para navios internacionais. O Japão permanece em estágio piloto, com produção limitada de biodiesel e metanol. A Índia investe na expansão da produção de etanol, biodiesel e biometano, articulando políticas públicas para ampliar infraestrutura, embora ainda dependa de importações pontuais.

Na América do Norte, os Estados Unidos apresentam produção expressiva de biodiesel, HVO, metanol e amônia, impulsionada por incentivos federais, como a *Inflation Reduction Act*. Embora a infraestrutura portuária para abastecimento ainda esteja em expansão, o país atua tanto como consumidor quanto como exportador, atendendo mercados da Europa e da Ásia.

Na África, a África do Sul encontra-se em estágio inicial de desenvolvimento logístico, com foco estratégico na produção de hidrogênio e amônia verdes voltados principalmente à exportação para Europa e Ásia. A produção doméstica para abastecimento interno e a infraestrutura portuária de bunkering ainda são incipientes.

De maneira transversal, os países relatam o uso predominante de biocombustíveis líquidos (como HVO e biodiesel) como solução de curto prazo, enquanto combustíveis como metanol, amônia e hidrogênio verdes permanecem concentrados em projetos-piloto, corredores verdes ou estratégias de médio e longo prazo. O etanol é mencionado pontualmente, associado sobretudo à capacidade produtiva nacional e a outros usos energéticos, sem caracterizar, na totalidade das contribuições, um combustível marítimo amplamente consolidado.

Em síntese, a logística global de combustíveis sustentáveis de navegação revela um cenário assimétrico, no qual poucos países concentram produção e exportação, enquanto a maioria depende de importações regionais ou internacionais. Essa configuração reforça a importância de investimentos em infraestrutura portuária, integração de cadeias produtivas e cooperação internacional para viabilizar a descarbonização do transporte marítimo em escala global.

4.2.5 Existe alguma iniciativa do país voltada para o estabelecimento de Corredores Marítimos Verdes/Sustentáveis?

As informações coletadas pelos postos diplomáticos apontam que o estabelecimento de Corredores Marítimos Verdes ou Sustentáveis constitui um dos principais instrumentos adotados pelos países para viabilizar, na prática e de maneira coordenada, a descarbonização do transporte marítimo. Essas iniciativas têm sido utilizadas como plataformas de cooperação internacional, permitindo testar combustíveis alternativos, tecnologias de propulsão, modelos regulatórios e soluções de infraestrutura em rotas específicas, antes de sua eventual ampliação em escala global.

Na Europa, observa-se ampla participação em corredores verdes, tanto em rotas nacionais quanto transfronteiriças. A Grécia destaca iniciativas voltadas à descarbonização de rotas insulares e ao desenvolvimento do Porto de Pireu como hub verde, além de projetos financiados pela União Europeia, como o Poseidon Med II. A Alemanha participa de corredores estratégicos, como Lübeck–Trelleborg e Hamburgo–Xangai, bem como de iniciativas regionais no Mar Báltico e da European Green Corridors Network. Suécia, Finlândia e Letônia também estão envolvidas em múltiplos corredores no Báltico e no Mar do Norte, incluindo rotas como Estocolmo–Turku, Turku–Estocolmo e Gotemburgo–Gent, com foco no uso de biocombustíveis e eletrificação.

Portugal participa ativamente de corredores sustentáveis internacionais, incluindo iniciativas com o Brasil, conectando os portos de Sines e Pecém, com ênfase no transporte de hidrogênio verde. O país também mantém parcerias com Angola, Namíbia, Alemanha e Países Baixos. A Eslovênia integra projetos trilaterais com Itália e Croácia, além de iniciativas como POSEIDONE e INNO2MARE, voltadas à inovação e sustentabilidade portuária. O Reino Unido lançou, em 2024, alguns dos primeiros corredores verdes do mundo, conectando seus portos a destinos europeus estratégicos.

Na Ásia, destacam-se iniciativas lideradas por Índia, China, Coreia do Sul e Singapura. A Índia desenvolve corredores nacionais e internacionais, como o Green and Digital Shipping Corridor com Singapura, além de um corredor costeiro ligando Kandla a Tuticorin. A China participa de corredores de grande escala, como Shanghai–Los Angeles, Shanghai–Hamburg, Beibu Gulf–Singapura e o Corredor do

Rio Yangtze. A Coreia do Sul investe em rotas transpacíficas verdes e integra iniciativas globais voltadas à criação de dezenas de corredores sustentáveis. Singapura, por sua vez, atua como hub internacional, negociando corredores verdes e digitais com diversos países, incluindo Roterdã, Japão, Estados Unidos, Austrália, China e Índia, além de planejar futuras parcerias com o Brasil.

Em outras regiões, a Noruega e o Brasil assinaram um Memorando de Entendimento para o desenvolvimento de um corredor marítimo verde, atualmente em fase de estudos de viabilidade. A África do Sul criou o South Africa–Europe Green Corridor, voltado ao transporte de minério de ferro com zero emissões. Os Estados Unidos participam de iniciativas multilaterais, como a Clydebank Declaration, o Green Shipping Corridor Hub e o Green Shipping Challenge, fomentando corredores internacionais em cooperação com parceiros estratégicos.

No geral, observa-se que os corredores marítimos verdes vêm sendo utilizados como instrumentos estratégicos de transição, permitindo a articulação entre políticas públicas, investimentos privados, infraestrutura portuária e inovação tecnológica. Embora a maturidade das iniciativas varie entre os países, observa-se uma tendência clara de expansão dessas rotas sustentáveis como elemento central da agenda global de descarbonização do transporte marítimo.

4.2.6 Quais incentivos (tributários e de financiamento de projetos produtivos e de PDI) disponíveis para atrair investimentos privados em combustíveis aquaviários sustentáveis?

O levantamento realizado pelos postos diplomáticos indica que os países vêm adotando uma combinação de incentivos tributários, instrumentos de financiamento público e mecanismos de apoio à pesquisa, desenvolvimento e inovação (PDI), visando atrair investimentos privados em combustíveis aquaviários sustentáveis e tecnologias para a descarbonização do transporte marítimo.

No contexto europeu, destacam-se mecanismos de financiamento e subsídios direcionados à modernização de frotas, ao retrofit de embarcações e ao desenvolvimento de infraestrutura portuária. A Grécia, por exemplo, instituiu o Green Shipping Fund, que oferece subsídios e incentivos fiscais para a adoção de tecnologias de redução de emissões e combustíveis alternativos. A Alemanha direciona recursos expressivos à inovação por meio do programa

MARITIME.zeroGHG, que financia projetos de demonstração e desenvolvimento de tecnologias climáticas neutras, incluindo hidrogênio verde, combustíveis sintéticos e soluções de Power-to-X, além de incentivos fiscais para investimentos nesses segmentos. A Finlândia adota isenções tributárias sobre eletricidade utilizada por navios conectados à rede e reduções fiscais para o uso de combustíveis alternativos.

Portugal, por meio do Programa C-10 – Navegação Ecológica, financiado pelo Plano de Recuperação e Resiliência, oferece incentivos financeiros para o retrofit de embarcações e a digitalização de sistemas a bordo, enquanto o Reino Unido combina subsídios, créditos fiscais e instrumentos regulatórios para fomentar o uso de biofuels, hidrogênio e eletrificação, no âmbito de sua Maritime Decarbonisation Strategy. Singapura destaca-se pelo cofinanciamento de até 50% para projetos de desenvolvimento de tecnologias verdes e pela concessão de reduções de taxas portuárias para navios certificados como sustentáveis, no âmbito da Maritime Singapore Green Initiative.

Em países asiáticos emergentes, como Índia, China e Coreia do Sul, os incentivos concentram-se na concessão de subsídios para construção e conversão de embarcações, apoio à produção doméstica de combustíveis alternativos e estímulos fiscais para projetos associados ao hidrogênio e à amônia verdes. A Coreia do Sul, por exemplo, oferece subsídios de até 30% para a construção e modernização de embarcações ecológicas, enquanto a Índia estrutura incentivos financeiros e regulatórios no âmbito de sua Future Fuel Strategy.

Nos Estados Unidos, embora não haja mandatos obrigatórios de uso, destacam-se incentivos indiretos por meio de programas federais de pesquisa, parcerias público-privadas e instrumentos de mercado, como o Sustainable Maritime Fuel Grand Challenge, o Renewable Fuel Standard e os estímulos previstos na Inflation Reduction Act, que impulsionam investimentos em biocombustíveis, HVO, metanol e amônia de baixo carbono.

Em termos gerais, os dados mostram que os incentivos adotados buscam reduzir riscos tecnológicos e financeiros, sinalizar demanda de longo prazo e estimular a participação do setor privado, combinando apoio direto a projetos produtivos, fomento à inovação e criação de ambientes regulatórios favoráveis à expansão do mercado de combustíveis aquaviários sustentáveis.

4.2.7 Para o conjunto de combustíveis sustentáveis com potencial de utilização no mercado de combustíveis aquaviários, quais adaptações relevantes de infraestrutura portuária de armazenamento e movimentação?

As respostas dos postos diplomáticos indicam que as adaptações de infraestrutura portuária para armazenamento, movimentação e abastecimento de combustíveis sustentáveis de navegação variam significativamente entre os países, refletindo diferenças no grau de maturidade tecnológica, no perfil logístico e na disponibilidade de produção doméstica de combustíveis alternativos. De modo geral, observa-se uma tendência à implantação de infraestruturas flexíveis e multimodais, capazes de atender diferentes combustíveis ao longo do processo de transição energética, evitando o aprisionamento tecnológico (lock-in).

Nos países do norte da Europa, como Finlândia, Suécia e Noruega, há infraestrutura consolidada para GNL, Bio-GNL, HVO, biogás e eletricidade, com redes de bunkering nos principais portos e ampla adoção de sistemas de Onshore Power Supply (OPS), especialmente para ferries e embarcações de curto curso. Essas adaptações incluem tanques dedicados ou segregados, sistemas de segurança específicos e integração com cadeias produtivas nacionais de biocombustíveis e combustíveis sintéticos. A produção doméstica relevante de HVO, Bio-GNL e biogás nesses países favorece a conexão direta entre portos e instalações industriais, reduzindo custos logísticos e emissões associadas.

No sul e leste da Europa, como Grécia, Portugal e Eslovênia, as adaptações de infraestrutura portuária ainda são mais pontuais e concentradas em portos estratégicos. A Grécia dispõe de terminais de GNL em Pireu, Patras e Heraclião, além de iniciativas voltadas ao uso de metanol e biocombustíveis, mas permanece fortemente dependente de importações. Portugal concentra sua infraestrutura de abastecimento no Terminal de Sines, com foco em GNL importado, enquanto a produção nacional de combustíveis marítimos sustentáveis é inexistente. A Eslovênia, por meio do Porto de Koper, encontra-se em fase de testes para hidrogênio, amônia e biodiesel, dependendo quase integralmente de importações de países vizinhos. Nesses casos, são utilizadas soluções logísticas flexíveis, como abastecimento por caminhões ou navios dedicados.

Alemanha e Reino Unido apresentam infraestrutura em processo de expansão e diversificação, com adaptação gradual de portos para múltiplos combustíveis,

incluindo biometano, metanol e amônia. Esses países associam as adaptações portuárias a projetos de retrofit de embarcações e à integração com cadeias industriais de Power-to-X (PtX), visando à produção e ao uso de combustíveis sintéticos de baixo carbono. A estratégia adotada prioriza instalações modulares, capazes de atender diferentes rotas e perfis de embarcação, e a incorporação de requisitos de segurança específicos para combustíveis como amônia e hidrogênio.

Na Ásia, a adaptação da infraestrutura portuária concentra-se em hubs estratégicos. A Coreia do Sul desenvolveu centros de bunkering em Ulsan e Busan, voltados ao abastecimento de GNL, metanol e amônia, com forte investimento estatal em armazenamento e segurança operacional. A China dispõe de ampla capacidade de produção de GNL, biodiesel e amônia verde, com terminais de bunkering aptos a atender o mercado doméstico e à exportação. Singapura consolida-se como hub regional de bunkering, com infraestrutura voltada principalmente a biofuels e combustíveis de baixo carbono, operando com matérias-primas importadas. Japão e Índia encontram-se em estágios iniciais ou pilotos, com infraestrutura ainda limitada para biodiesel, metanol e biometano, mas com planos de expansão associados a políticas públicas e metas de mistura.

Na América do Norte, os Estados Unidos apresentam produção significativa de biodiesel, HVO, metanol e amônia, com infraestrutura portuária ainda limitada, porém em expansão, voltada tanto ao consumo doméstico quanto à exportação para Europa e Ásia. Na África, a África do Sul encontra-se em estágio inicial de adaptação de infraestrutura portuária, com foco no desenvolvimento de hidrogênio e amônia verdes destinados principalmente à exportação, sem ainda dispor de rede consolidada de abastecimento doméstico de combustíveis marítimos sustentáveis.

No panorama analisado, o GNL configura-se como o principal combustível de transição nas regiões avaliadas, sustentando grande parte das adaptações iniciais de infraestrutura portuária. Os biocombustíveis líquidos (HVO, biodiesel e etanol) complementam a matriz energética no curto prazo, exigindo adaptações relativamente menores nos sistemas de armazenamento e movimentação. Já a amônia e o hidrogênio verdes demandam investimentos mais significativos em infraestrutura dedicada, protocolos de segurança e capacitação operacional, o que explica sua adoção mais concentrada em países com maior capacidade tecnológica ou vocação exportadora.

4.2.8 Existem políticas de incentivo à infraestrutura portuária para movimentação, armazenamento e abastecimento de combustíveis sustentáveis de navegação nos terminais portuários?

Os postos diplomáticos relatam que diversos países já adotam políticas públicas específicas de incentivo à infraestrutura portuária voltadas à movimentação, armazenamento e abastecimento de combustíveis sustentáveis de navegação, reconhecendo o papel estratégico dos portos como elementos centrais para a descarbonização do transporte marítimo. Essas políticas assumem diferentes formatos, combinando financiamento público direto, subsídios, instrumentos regulatórios, redução de tarifas portuárias e apoio a projetos-piloto.

No contexto europeu, a Grécia destaca-se pelo Port Electrification Program, que prevê investimentos da ordem de €180 milhões para a implantação de infraestrutura de Onshore-Power-Supply em portos estratégicos, além de instrumentos como o Green Shipping Fund, que também pode apoiar adaptações portuárias associadas à redução de emissões. A Finlândia adota políticas de incentivo à eletrificação portuária, incluindo isenção de impostos sobre a eletricidade fornecida a navios conectados à rede, estimulando a expansão de sistemas de Onshore Power Supply (OPS). A Noruega complementa essas iniciativas com políticas ambientais restritivas em áreas sensíveis, como os fiordes UNESCO, associadas ao apoio à infraestrutura de shore power e ao uso de combustíveis alternativos.

Portugal utiliza recursos do Plano de Recuperação e Resiliência para apoiar investimentos em infraestrutura portuária, com foco em portos estratégicos como Sines, alinhando esses investimentos às metas do PNEC 2030 e ao desenvolvimento de combustíveis renováveis. No Reino Unido, a Maritime Decarbonisation Strategy articula incentivos à infraestrutura portuária por meio de subsídios, instrumentos regulatórios e programas como a RTFO e o AFIR, promovendo a instalação de infraestrutura de abastecimento de energia limpa e combustíveis alternativos nos portos.

Na Ásia, Singapura adota uma política ativa de incentivo à infraestrutura portuária sustentável, combinando cofinanciamento público de até 50% para projetos de desenvolvimento tecnológico com reduções de taxas portuárias para navios certificados como sustentáveis, no âmbito da Maritime Singapore Green Initiative. A Coreia do Sul investe fortemente, com apoio estatal, na adaptação de portos

estratégicos como Ulsan e Busan para o abastecimento de GNL, metanol e amônia. A China também promove investimentos públicos em infraestrutura portuária voltada a combustíveis alternativos, integrando portos à sua ampla capacidade produtiva de biocombustíveis, metanol e amônia verdes.













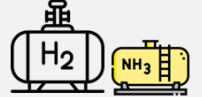

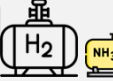

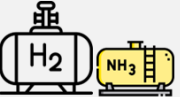








Nos Estados Unidos, embora não existam mandatos nacionais específicos, observam-se políticas de incentivo indiretas à infraestrutura portuária por meio de programas federais de pesquisa, parcerias público-privadas e estratégias nacionais voltadas à descarbonização marítima, estimulando investimentos em terminais e soluções de abastecimento de combustíveis sustentáveis. Na África do Sul, os incentivos à infraestrutura portuária ainda se concentram em projetos voltados à exportação de hidrogênio e amônia verdes, com foco inicial em corredores internacionais, sem uma política estruturada para abastecimento doméstico.

Observa-se que as políticas de incentivo à infraestrutura portuária vêm sendo utilizadas como instrumentos habilitadores da transição energética, buscando reduzir riscos de investimento, atrair capital privado e permitir a implantação gradual de soluções de abastecimento de combustíveis sustentáveis. Embora a abrangência e o grau de maturidade dessas políticas variem entre os países, observa-se uma tendência de fortalecimento do papel dos portos como hubs energéticos, integrando eletrificação, bunkering de combustíveis alternativos e cadeias de suprimento de baixo carbono.

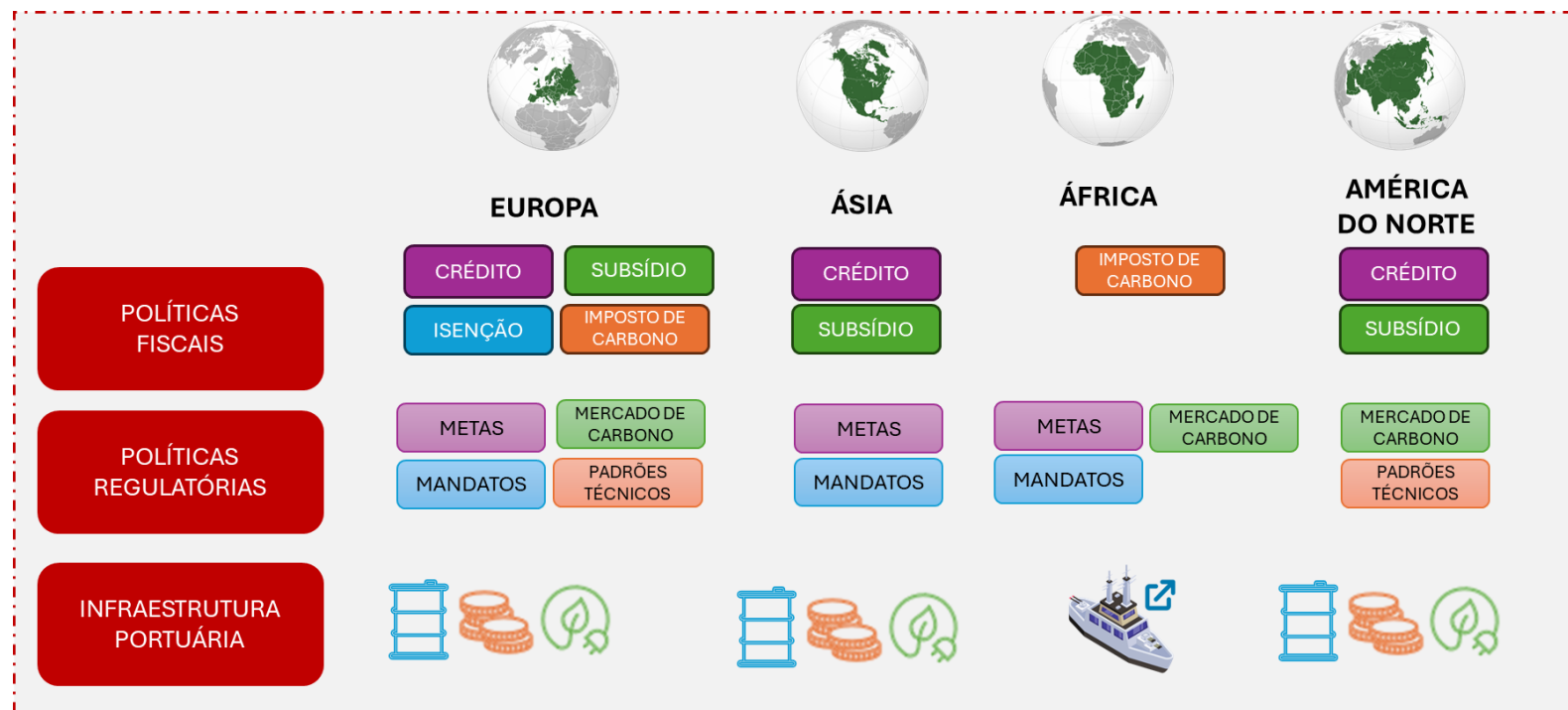
Os Quadros X e Y apresentam, sinteticamente e comparativamente, as contribuições obtidas na consulta aos postos diplomáticos, organizadas por região geográfica — Europa, Ásia, África e América do Norte. Para fins de sistematização e leitura analítica, as oito perguntas que orientaram a consulta foram consolidadas em sete blocos temáticos: (i) apoio às diretrizes da Organização Marítima Internacional (IMO); (ii) combustíveis de transição; (iii) combustíveis sustentáveis de navegação; (iv) corredores marítimos verdes/sustentáveis; (v) políticas fiscais; (vi) políticas regulatórias; e (vii) infraestrutura portuária e abastecimento de combustíveis sustentáveis.

Essa organização permite evidenciar tanto as convergências quanto as diferenças regionais em relação às estratégias de descarbonização do transporte marítimo, conectando os instrumentos normativos e de política pública às condições concretas de implantação nos portos e cadeias de suprimentos.

Quadro 8. Ilustração das perguntas e respostas do benchmarking internacional

	 EUROPA	 ÁSIA	 ÁFRICA	 AMÉRICA DO NORTE
APOIA AS DIRETRIZES DA IMO?	 SIM	 EM PARTES	 SIM	 NÃO
COMBUSTÍVEL DE TRANSIÇÃO	 LNG	   LNG H ₂ METANOL		
COMBUSTÍVEL SUSTENTÁVEL DE NAVEGAÇÃO	 H ₂ NH ₃	   H ₂ NH ₃ METANOL	 H ₂ NH ₃	    H ₂ NH ₃ METANOL
APOIA A CRIAÇÃO DE CORREDORES VERDES?				
<ul style="list-style-type: none"> • Corredores Verdes: • Já em operação → Europa (Finlândia, Alemanha, Suécia, Reino Unido), Ásia (China, Singapura) e EUA. • Em criação → Noruega, Grécia, Portugal, Croácia, Eslovênia, África do Sul, Japão, Coreia do Sul e Índia. 				

Quadro 9. Ilustração das perguntas e respostas do benchmarking internacional (continuação)²⁵



LEGENDA

- Abastecimento Portuário (armazenamento e bunkering de combustíveis sustentáveis)
- Incentivos à Infraestrutura (financiamento, subsídios, tarifas e apoio público)

- Adequação e Expansão de Terminais (OPS, eletrificação, retrofit e adaptação física)
- Infraestrutura portuária para combustíveis sustentáveis prioritariamente orientada ao mercado externo

²⁵ •Europa - infraestrutura consolidada, com abastecimento múltiplo, OPS amplamente difundido e políticas estruturadas de incentivo;
 •Ásia - desenvolvimento concentrado em hubs estratégicos, forte apoio estatal e expansão coordenada da infraestrutura portuária;
 •África – infraestrutura portuária ainda incipiente, com iniciativas concentradas em terminais estratégicos para exportação;
 •América do Norte – capacidade produtiva relevante, com infraestrutura portuária e incentivos em expansão, ainda de forma não homogênea.
 Obs.: A presença dos ícones indica a existência de iniciativas, políticas ou capacidades identificadas nas respostas, sem avaliação de grau de maturidade

4.3 PANORAMA DA PARTICIPAÇÃO SOCIAL

O Ministério de Minas e Energia (MME) coordena um Grupo de Trabalho com o objetivo de subsidiar o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) na elaboração de políticas públicas relacionadas à transição energética. Para assegurar que tais políticas reflitam de forma equilibrada os impactos, desafios e oportunidades associados a esse processo, foram ouvidos diversos segmentos da sociedade potencialmente afetados pela transição. Nesse contexto, a seção a seguir apresenta um panorama da participação social, destacando os principais atores envolvidos e as contribuições recebidas ao longo do processo.

A participação dos diferentes setores que compõem e/ou podem compor o segmento aquaviário é fundamental, pois permite mapear não apenas as preocupações e fragilidades, mas também os pontos fortes e as oportunidades estratégicas para o setor. Essa interlocução entre os atores envolvidos possibilita a identificação de sinergias e desafios comuns, fornecendo subsídios para a formulação de estratégias mais consistentes. Nesse sentido, o engajamento multissetorial contribui para a consolidação dos elementos-chave necessários à transição energética, assegurando benefícios mútuos, maior resiliência setorial e um desenvolvimento sustentável e integrado, permitindo assim formular e revisar políticas públicas.

Foram realizados 24 encontros, que resultaram em 39 participações de representantes de diferentes setores, conforme ilustrado na **Figura 27**. Observa-se que o segmento de produtores de combustíveis e logística e navegação apresentaram a maior representatividade, correspondendo a 59% do total de participações.

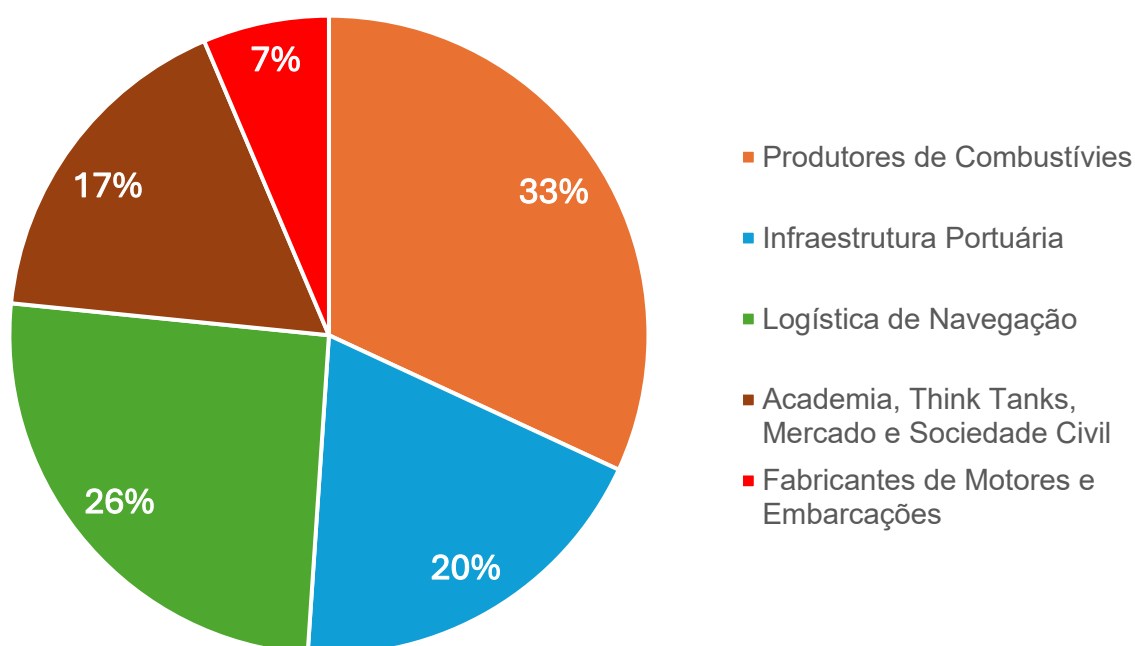
Destaca-se, nesse contexto, a participação das companhias Maersk, CMA CGM e MSC, as três maiores transportadoras marítimas de contêineres do mundo, que juntas detêm uma quota de mercado combinada de aproximadamente 47,2% da capacidade global, segundo dados de 2025.

A infraestrutura portuária respondeu por 20% das participações, refletindo a importância do tema diante dos desafios estruturais e da necessidade de modernização dos portos brasileiros.

Os segmentos de produção de combustíveis e Academia, Think Tanks, mercado e sociedade civil representaram, cada um, 17%, demonstrando um equilíbrio entre o debate técnico-científico e o foco na inovação energética.

A taxa de participação do segmento de fabricantes de motores pode ser considerada baixa em termos numéricos, em razão do número globalmente limitado de fabricantes de motores para grandes embarcações. Ainda assim, a participação foi relevante do ponto de vista de representatividade de mercado, uma vez que as três empresas participantes — Everllence, Wärtsilä e Caterpillar — concentram mais de 60% dos motores marítimos atualmente em operação na frota mundial.

Figura 27. Participação Relativa dos Segmentos Econômicos nas Reuniões Realizadas²⁶



4.3.1 Desafios Econômicos, Financeiros e Regulatórios da Transição Energética no Transporte Aquaviário

O elevado custo de produção dos combustíveis sustentáveis constitui um dos principais entraves à transição energética no transporte aquaviário. Esses combustíveis ainda apresentam preços significativamente superiores aos dos

²⁶ A participação percentual por segmento refere-se exclusivamente ao número de instituições presentes nas reuniões realizadas, não devendo ser interpretada como indicativo de protagonismo, grau de engajamento, liderança temática ou influência relativa nos debates. As variações observadas podem estar associadas a fatores como disponibilidade institucional, estrutura organizacional, escopo de atuação ou obrigações regulatórias dos diferentes segmentos.

combustíveis fósseis — o chamado *green premium* —, situando-se atualmente entre 30% e 40% acima dos valores praticados para os combustíveis convencionais. Esse diferencial é agravado tanto pelo encarecimento da biomassa quanto pelo aumento estimado entre 20% e 40% nos custos de construção naval de embarcações movidas por combustíveis alternativos. Exemplos recentes, como o combustível B24, evidenciam que os preços dos combustíveis sustentáveis ainda superam de forma expressiva os do VLSFO, amplamente utilizado na navegação atual.

Como consequência direta desse diferencial de custos, surgem preocupações relevantes quanto à competitividade da cabotagem, especialmente em relação ao transporte rodoviário — mais poluente, porém mais barato —, bem como no comércio exterior, diante do risco de elevação dos fretes. Soma-se a isso o receio de que a adoção de taxas fixas sobre emissões, particularmente no âmbito internacional, reduza a competitividade dos produtos brasileiros em mercados mais distantes, considerando o perfil das exportações nacionais, caracterizadas por grandes volumes e baixo valor agregado.

Nesse contexto de pressão econômica, a renovação da frota e o *retrofit* de embarcações existentes passam a demandar investimentos elevados, o que torna imprescindível a criação e o fortalecimento de linhas de financiamento diferenciadas, como as oferecidas pelo Fundo da Marinha Mercante (FMM). Além disso, investidores necessitam de sinalizações claras e de longo prazo quanto à demanda por combustíveis sustentáveis, frequentemente viabilizadas por contratos de *offtake*, como condição essencial para a estruturação financeira de novas unidades de produção e para a mobilização de grandes aportes de capital.

Diante desse cenário, torna-se fundamental avaliar de que forma o governo pode estruturar mecanismos de financiamento, subvenção e mitigação de riscos, evitando que o ônus financeiro inviabilize a transição energética antes de sua consolidação. Uma das alternativas mais recorrentes para reduzir o diferencial de custos consiste na adoção de medidas fiscais, como a redução ou eliminação temporária de tributos federais e estaduais incidentes sobre os combustíveis sustentáveis. A implementação de um período de transição tributária de aproximadamente cinco anos, com alíquotas *ad valorem* aplicadas sobre preços de referência, poderia promover maior isonomia tributária e previsibilidade de custos.

Esse conjunto de medidas fiscais e financeiras contribuiria para a criação de um ambiente mais seguro para que armadores e operadores de cabotagem realizem investimentos na adaptação de suas frotas, sem comprometer a viabilidade operacional e financeira das atividades. No entanto, no plano internacional, persistem preocupações adicionais quanto aos impactos das discussões sobre a taxaço de carbono no âmbito da Organização Marítima Internacional (IMO), que podem afetar negativamente as exportações brasileiras.

No âmbito doméstico, a Associação Brasileira de Armadores de Cabotagem (ABAC) [82] destaca distorções tributárias relevantes, como a disparidade entre a carga tributária incidente sobre o bunker utilizado na cabotagem e aquela aplicada à navegação de longo curso. Soma-se a esse quadro o risco de dependência tecnológica externa, o que reforça a necessidade de políticas públicas que estimulem o desenvolvimento da indústria nacional e ampliem a segurança jurídica e econômica para os investidores.

Esses desafios econômicos e competitivos estão diretamente associados ao desenho regulatório.

Nesse sentido, é fundamental integrar esse arcabouço ao Plano Clima, que orienta a estratégia brasileira de mitigação e adaptação às mudanças climáticas, bem como à Taxonomia Sustentável do Ministério da Fazenda, que define critérios para classificar atividades econômicas alinhadas à transição de baixo carbono e direcionar fluxos de financiamento.

Adicionalmente, a implementação do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE) representa um elemento central para reforçar a credibilidade do país no cenário internacional, ao internalizar o preço do carbono e criar sinais econômicos compatíveis com mecanismos globais, como os instrumentos da IMO e os ajustes de carbono na fronteira (CBAM) [83]. A convergência entre esses instrumentos amplia a previsibilidade regulatória, reduz riscos para investimentos em combustíveis marítimos de baixo carbono e posiciona o Brasil de forma mais competitiva na transição energética do transporte marítimo.

A utilização de metodologias de Análise de Ciclo de Vida alinhadas à realidade nacional é particularmente relevante para evitar distorções decorrentes da aplicação de parâmetros estrangeiros, sobretudo no que se refere ao risco de Mudança Indireta do Uso da Terra (*Indirect Land Use Change – ILUC*). O Brasil dispõe de instrumentos

próprios e consolidados, como o RenovaCalc, além de uma base de dados robusta sobre emissões, uso da terra e práticas agrícolas. Esses ativos técnicos devem ser apresentados e defendidos nos fóruns internacionais, inclusive na IMO, como referência para a avaliação da sustentabilidade dos biocombustíveis nacionais.

Esse posicionamento é reforçado por avanços institucionais recentes. A Taxonomia Sustentável Brasileira, liderada pelo Ministério da Fazenda, adota critérios fundamentados em evidências científicas e na Análise de Ciclo de Vida para classificar atividades e ativos compatíveis com a transição para uma economia de baixo carbono, estabelecendo um elo direto entre política climática, regulação financeira e atração de investimentos sustentáveis. De forma complementar, o desenvolvimento do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE) [83] estabelece as bases para a precificação de carbono no país, com forte ênfase em monitoramento, reporte e verificação (MRV), integridade ambiental e governança — elementos essenciais para a convergência com mecanismos internacionais de mitigação.

Em conjunto, esses instrumentos demonstram que o Brasil avança na construção de um arcabouço regulatório integrado, capaz de sustentar a adoção de critérios *WtW* robustos, defender metodologias nacionais de LCA e assegurar que os biocombustíveis brasileiros sejam reconhecidos como opções elegíveis e competitivas no processo de descarbonização do transporte marítimo internacional.

Para consolidar esse movimento, recomenda-se a harmonização regulatória por meio da criação de um marco legal nacional alinhado às diretrizes da IMO, mas adaptado às condições específicas do país. Essa estrutura deve garantir neutralidade tecnológica e de matérias-primas, permitindo que diferentes soluções contribuam de forma equilibrada para a transição energética. Sugere-se ainda o desenvolvimento de um sistema nacional de certificação compatível com o mecanismo de Intensidade de Combustível de GEE (*GHG Fuel Intensity – GFI*) da IMO, a atualização da Lei do Combustível do Futuro para incluir o metanol verde, a amônia verde e critérios técnicos de certificação, bem como a revisão das normas setoriais — como as NORMAMs da Marinha e as resoluções da ANP — para permitir o uso seguro de novos combustíveis e alinhar os padrões nacionais a normas internacionais, como a ISO 8217:2024.

No plano da implementação, recomenda-se também a definição de metas mandatórias ou indicativas para o uso de biocombustíveis, hidrogênio verde e seus

derivados — como amônia e e-metanol —, acompanhadas de incentivos fiscais e outros mecanismos de apoio destinados a ampliar a produção, reduzir custos e desenvolver a infraestrutura necessária à sua adoção no setor marítimo. Estudos técnicos indicam que os *drop-in* biocombustíveis apresentam elevado potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa (entre aproximadamente 68% e 95% em comparação com combustíveis fósseis de referência) [18] e podem ser utilizados na infraestrutura e nos motores existentes, o que os torna uma opção particularmente atrativa para a descarbonização no curto e médio prazos, desde que superados desafios relacionados à disponibilidade de biomassa e aos investimentos em biorefino e tecnologia.

Do ponto de vista econômico-fiscal, os setores produtivo e logístico ressaltam a necessidade de políticas que reduzam o diferencial de custo entre combustíveis fósseis e sustentáveis, viabilizando financeiramente os investimentos. Defende-se, ainda, a adoção de medidas fiscais para eliminar a diferença de preço entre o combustível fornecido à cabotagem e à navegação interior em relação ao destinado à navegação de longo curso, corrigindo assimetrias de mercado. Entre as propostas, destacam-se a criação de linhas de crédito diferenciadas pelo FMM para apoiar a construção de novas embarcações e o *retrofit* das existentes. A Transpetro, inclusive, recomenda a instituição de um mecanismo financeiro específico para a renovação e adaptação da frota.

Adicionalmente, os participantes defendem incentivos fiscais e tributários, incluindo a correção de distorções como a diferença na tributação do bunker utilizado na cabotagem e no longo curso, bem como a isenção do ICMS sobre o bunker da cabotagem, proposta pela ABAC, que teria impacto limitado sobre a arrecadação nacional. A ABEPH [84], por sua vez, defende a isenção de tributos como PIS/Cofins, ICMS e Imposto de Importação sobre equipamentos e insumos necessários à transição energética.

Apesar dessas propostas, persistem barreiras regulatórias e estruturais adicionais. A falta de alinhamento entre as políticas da IMO e o RenovaBio pode comprometer a elegibilidade internacional dos combustíveis brasileiros, assim como a adoção de metodologias desatualizadas de Análise de Ciclo de Vida, que podem classificar biocombustíveis nacionais como de alto risco de ILUC. Soma-se a isso a resistência geopolítica, especialmente da União Europeia, que expressa

preocupações quanto à possível competição com a produção de alimentos e ao risco de desmatamento. Paralelamente, a concorrência com os setores rodoviário e aéreo pelo uso da biomassa pressiona preços e limita a disponibilidade de matéria-prima para o transporte aquaviário.

Diante desse conjunto de desafios, a atuação coordenada do poder público torna-se condição indispensável para viabilizar a transição energética do transporte aquaviário. O governo pode exercer um papel estruturante por meio da articulação entre ministérios e órgãos reguladores, da aceleração de obras de dragagem e aprofundamento de calado em portos estratégicos — permitindo o acesso de embarcações maiores e mais eficientes — e da criação de subsídios temporários que equalizem os preços dos combustíveis renováveis em relação aos fósseis. Adicionalmente, a desoneração tributária para a importação e a produção nacional de tecnologias de propulsão limpa constitui instrumento fundamental para reduzir assimetrias de custo, destravar investimentos e romper o atual círculo vicioso entre oferta e demanda.

4.3.2 Infraestrutura Portuária e Logística como vetores críticos da transição energética

A infraestrutura portuária representa outro eixo central de desafios para a transição energética no transporte aquaviário. De modo geral, a infraestrutura portuária brasileira é considerada defasada, exigindo adaptações específicas para cada novo tipo de combustível. O país ainda carece de portos plenamente preparados para receber embarcações de nova geração e operar simultaneamente com múltiplos combustíveis sustentáveis. Isso inclui o desenvolvimento de infraestruturas de *bunkering* capazes de armazenar e fornecer hidrogênio renovável, amônia verde, metanol e biocombustíveis líquidos, cujos requisitos de segurança, manuseio e densidade energética diferem substancialmente daqueles associados aos combustíveis fósseis tradicionais.

Além da defasagem estrutural, destacam-se desafios como a necessidade de adequação da infraestrutura às novas tecnologias e combustíveis, os elevados custos iniciais de investimento em equipamentos mais eficientes e a adaptação dos portos às crescentes exigências ambientais. Soma-se a esse cenário a eletrificação portuária, especialmente por meio de sistemas de *Onshore Power Supply* (OPS), que demanda investimentos expressivos em redes elétricas, subestações e reforço da

infraestrutura local. Persistem, ainda, problemas recorrentes de suprimento energético em portos estratégicos, como Santos e Rio Grande, limitações de acesso decorrentes de canais com calado insuficiente para embarcações modernas de maior porte e a ausência de padronização nos sistemas de abastecimento de bunker.

Esse conjunto de limitações dá origem a um dilema estrutural: por um lado, a incorporação de novos navios e tecnologias é desestimulada pela inexistência de infraestrutura adequada; por outro, a produção de combustíveis verdes permanece limitada pela falta de demanda consistente por parte da frota existente. Trata-se de um clássico problema de coordenação entre oferta e demanda, que tende a persistir na ausência de políticas públicas estruturantes capazes de alinhar investimentos ao longo da cadeia.

No âmbito mais amplo da logística de navegação, o sucesso da descarbonização depende de uma integração eficiente “ponta a ponta”, conectando os portos aos modais ferroviário e rodoviário, de modo a assegurar o fluxo contínuo de biocombustíveis, biomassa e demais insumos energéticos. Nesse contexto, a criação de corredores verdes — rotas comerciais dotadas de infraestrutura dedicada de baixo carbono — surge como uma alternativa promissora, embora complexa, uma vez que requer coordenação internacional, harmonização regulatória e padronização técnica entre diferentes jurisdições e agentes.

Apesar desses desafios estruturais, operadores portuários e armadores vêm avançando gradualmente na adoção de tecnologias e frotas mais limpas. Em âmbito internacional, a Maersk destaca-se com uma frota de 48 embarcações aptas ao uso de combustíveis alternativos, como metanol e gás liquefeito, das quais 14 já se encontram em operação. No Brasil, o Porto do Açu consolida-se como um hub estratégico para o hidrogênio e seus derivados, tendo sediado o primeiro abastecimento marítimo com HVO no país, além de investir em sistemas de OPS e no desenvolvimento de corredores verdes.

Empresas como a Subsea7 realizam testes com misturas de combustíveis sustentáveis, como FAME 30 e HVO 30, ao mesmo tempo em que investem em projetos de hibridização e em ferramentas digitais voltadas ao aumento da eficiência energética. Entidades setoriais como SYNDARMA e ABEAM destacam que novas licitações da Petrobras já incorporam exigências relacionadas à adoção de frotas com propulsão diesel-elétrica, potencial de conversão para etanol ou metanol e projetos de

retrofit para sistemas híbridos [85]. A adoção do OPS também é apoiada por instituições como a CLIA Brasil [86], que aponta reduções de até 98% nas emissões durante a atracação.

No caso dos eletrocombustíveis (*e-fuels*), os desafios são ainda mais significativos, uma vez que sua produção demanda grandes volumes de energia renovável, água e áreas disponíveis, além de ainda não ter atingido escala comercial competitiva. Adicionalmente, a ausência de regulamentações claras e de incentivos governamentais específicos pode retardar a implementação dessas soluções. A diversidade de *stakeholders* envolvidos — incluindo armadores, operadores portuários e fornecedores de tecnologia — também dificulta a coordenação necessária para uma transição eficaz.

Em nível global, observa-se um movimento consistente de adaptação da infraestrutura portuária para suportar soluções de baixo carbono, incluindo o fornecimento futuro de combustíveis com conteúdo renovável, como biocombustíveis, amônia e metanol, bem como a instalação de carregadores elétricos e estações de abastecimento de Gás Natural Liquefeito (GNL). A integração desses recursos reforça o papel dos portos como elementos centrais da cadeia de valor energética global.

No contexto brasileiro, diversos portos já investem em geração de energia renovável, como solar e eólica, e se posicionam para apoiar o desenvolvimento da energia eólica offshore. Estudo recente da ANTAQ [5] indica que o setor portuário vem investindo em sistemas inteligentes de gestão logística, no fornecimento de combustíveis menos poluentes, no planejamento e na implementação de medidas de eficiência energética e na geração de energia renovável para atividades operacionais e administrativas. Incentivos financeiros, como o *Environmental Ship Index* (ESI), têm sido utilizados como critério para concessão de descontos em tarifas portuárias, estimulando a operação de navios mais eficientes e menos poluentes. A substituição de equipamentos portuários por modelos elétricos ou movidos a biocombustíveis, hidrogênio e seus derivados já ocorre em alguns portos e desempenha papel relevante no contexto da transição energética.

Do ponto de vista ambiental, as emissões de gases de efeito estufa associadas ao transporte marítimo e às operações portuárias estão diretamente relacionadas ao consumo de combustíveis. Nesse sentido, investimentos em eficiência operacional podem gerar ganhos expressivos no curto prazo. Estudos indicam que a otimização

das operações pode reduzir os custos com combustível entre 20% e 25% e diminuir as emissões anuais em mais de 200 milhões de toneladas de CO₂. Além de reduzir custos e emissões imediatas, essas estratégias contribuem para mitigar impactos financeiros futuros associados à adoção de combustíveis alternativos.

Paralelamente, o desenvolvimento e a integração de tecnologias alternativas — como o uso de biocombustíveis, GNL e sistemas de propulsão baseados em fontes renováveis, incluindo energia eólica por meio de velas rígidas e painéis solares — ampliam o leque de soluções disponíveis. O planejamento das operações de dragagem, que em alguns portos brasileiros pode responder por até 80% das emissões portuárias, também deve incorporar critérios de eficiência e redução da pegada de carbono, assim como projetos de infraestrutura voltados à substituição de sistemas de iluminação e refrigeração por tecnologias mais eficientes.

Por fim, no eixo de infraestrutura, logística e inovação, as recomendações concentram-se na criação de condições para o suprimento e a operação segura dos novos combustíveis. É essencial investir na modernização da infraestrutura portuária, com o desenvolvimento de hubs logísticos capazes de abastecer embarcações com múltiplos combustíveis — como hidrogênio, amônia, metanol e biocombustíveis —, garantindo flexibilidade operacional e resiliência. A implantação de corredores verdes, apoiada por políticas públicas e cooperação internacional, é amplamente reconhecida como estratégia-chave para acelerar a transição energética e difundir o uso de combustíveis de baixo carbono no transporte aquaviário.

Desafios tecnológicos na adoção de combustíveis e sistemas de baixo carbono

A adoção de combustíveis e tecnologias de baixo carbono na navegação enfrenta um conjunto complexo de desafios tecnológicos que impactam diretamente a operação, a segurança e a competitividade do transporte aquaviário, especialmente na navegação de longo curso. Esses desafios decorrem tanto das características intrínsecas dos novos combustíveis quanto do estágio de maturidade das tecnologias de propulsão e da infraestrutura de apoio necessária à sua utilização em larga escala.

Um dos principais entraves está associado às características físico-químicas dos combustíveis alternativos, em especial à sua menor densidade energética quando comparados ao óleo combustível pesado (HFO). Para armazenar a mesma quantidade de energia, o Gás Natural Liquefeito (GNL) demanda aproximadamente 1,89 vezes mais volume; o metanol, 2,47 vezes; a amônia, 3,07 vezes; e o hidrogênio,

até 4,63 vezes mais espaço. Essa limitação afeta diretamente a capacidade de carga útil das embarcações ou reduz sua autonomia operacional, impondo compromissos relevantes de projeto, arranjo interno e estratégia operacional.

Além da questão volumétrica, alguns desses combustíveis impõem requisitos extremos de armazenamento. O hidrogênio líquido, por exemplo, exige temperaturas criogênicas da ordem de -253 °C , enquanto o GNL requer cerca de -162 °C , o que implica desafios significativos em termos de isolamento térmico, seleção de materiais avançados e adoção de protocolos rigorosos de segurança. No caso dos biocombustíveis, como o biodiesel (FAME), surgem limitações relacionadas à menor estabilidade à oxidação e à sua natureza higroscópica, que favorece a absorção de água, o crescimento microbiológico, a degradação prematura do combustível e o entupimento de filtros, com impactos diretos sobre a confiabilidade operacional.

As questões de segurança e toxicidade constituem outro vetor crítico. A amônia, embora considerada uma rota promissora para a neutralidade de carbono, é extremamente tóxica, podendo causar efeitos letais à tripulação mesmo em baixas concentrações. Sua utilização requer sistemas de ventilação, detecção, contenção e vedação significativamente mais robustos do que aqueles empregados atualmente. O hidrogênio, por sua vez, apresenta ampla faixa de inflamabilidade e baixa energia mínima de ignição, exigindo projetos que evitem o acúmulo de gás em espaços confinados, onde o risco de explosão é elevado. Soma-se a isso a corrosividade de combustíveis como o metanol e determinados biocombustíveis, capazes de degradar vedações, mangueiras, elastômeros e componentes metálicos, especialmente aqueles à base de cobre e bronze.

No campo dos motores e sistemas de propulsão, a maturidade tecnológica ainda é limitada. Motores movidos exclusivamente a amônia ou hidrogênio permanecem, em grande medida, em fases de teste, demonstração ou primeiras encomendas, com expectativa de maior disponibilidade comercial apenas ao final desta década. As soluções *dual-fuel*, embora ofereçam flexibilidade operacional, implicam aumentos significativos nos custos de construção — estimados entre 20% e 40% — em função da necessidade de tanques dedicados, sistemas auxiliares de suprimento e maior complexidade de integração.

Em embarcações de apoio marítimo, surgem ainda preocupações específicas relacionadas ao desempenho desses novos combustíveis em sistemas de

posicionamento dinâmico (*Dynamic Positioning – DP*), nos quais qualquer perda de potência pode representar riscos operacionais severos, especialmente em operações próximas a plataformas offshore.

Persistem também gargalos tecnológicos associados às soluções de eletrificação. As limitações atuais de peso, densidade energética e autonomia das baterias restringem sua aplicação a operações de curta distância ou a sistemas híbridos. Como consequência, o setor tem direcionado esforços para alternativas como motores de combustão interna adaptados e pilhas a combustível, tecnologias que ainda buscam maior maturidade, padronização e escala comercial.

No âmbito da infraestrutura elétrica, a implementação do *Onshore Power Supply* (OPS) enfrenta desafios técnicos adicionais. A ausência de padronização de tensão e frequência entre embarcações e redes terrestres impõe custos elevados, especialmente quando são necessários conversores de frequência para atender navios que operam em padrões distintos. Ademais, o gerenciamento de cabos de alta tensão requer sistemas complexos capazes de compensar movimentos de maré, variações de nível do cais e esforços mecânicos, de modo a assegurar segurança e confiabilidade operacional.

Outra tecnologia em avaliação é a captura de carbono a bordo (*Onboard Carbon Capture – OCC*). Embora apresente potencial para reduzir emissões em embarcações movidas a combustíveis fósseis, essa solução impõe uma penalidade energética significativa, podendo elevar o consumo de combustível em até 40%. Além disso, inexistente atualmente uma infraestrutura portuária padronizada para recepção, armazenamento e destinação do CO₂ capturado, o que limita sua aplicabilidade, sobretudo na navegação de longo curso.

O conjunto desses desafios tecnológicos exerce impacto direto sobre os custos operacionais e a competitividade do setor. Há uma preocupação concreta de que o aumento dos fretes — impulsionado por combustíveis até 40% mais caros e por embarcações com custos de construção significativamente superior — provoque um retrocesso logístico, com a migração de cargas da cabotagem para o transporte rodoviário, mais barato, porém ambientalmente mais intensivo em emissões.

Nesse contexto, a atuação da academia, dos centros de pesquisa e da indústria torna-se fundamental para a geração de conhecimento técnico e o desenvolvimento de soluções adaptáveis. Fabricantes como a Wärtsilä já demonstraram a capacidade

de seus motores a gás operarem com misturas contendo até 25% de hidrogênio, enquanto a Caterpillar aposta no metanol como combustível de transição. A Petrobras obteve resultados positivos com o uso de biodiesel B24 em navios como o *Darcy Ribeiro*, e a Amaggi realizou com sucesso testes com B100 em embarcações fluviais. A Raízen defende o uso do etanol como combustível marítimo sustentável, ressaltando sua eficiência energética e elegibilidade junto à IMO.

Testes conduzidos pela Maersk com misturas de etanol anidro brasileiro em motores a metanol demonstraram elevado desempenho sem comprometer a confiabilidade dos sistemas. Ensaio com misturas E10 confirmaram a viabilidade técnica, enquanto novos testes com E50 e, posteriormente, com etanol puro (E100) estão planejados. Resultados positivos em motores a metanol também foram obtidos pela Everllence. A Maersk concluiu recentemente os testes com o navio *Laura Mærsk*, envolvendo uma mistura de 10% de etanol e 90% de e-metanol, confirmando que o etanol pode ser integrado de forma segura e eficaz, abrindo caminho para misturas com maior teor renovável.

Instituições como Agroicone, CEBRI e COPPE/UFRJ têm produzido estudos que subsidiam a formulação de políticas públicas e estratégias de descarbonização, enquanto a DNV contribui com análises sobre a transição global da frota, a disponibilidade futura de combustíveis e os níveis de eficiência energética necessários para mitigar a escassez de alternativas carbono-neutras.

As questões tecnológicas, operacionais e de segurança permanecem, portanto, no centro do debate. Entidades como o Sindicato Nacional das Empresas de Navegação Marítima (SYNDARMA) e empresas como a Subsea7 alertam para potenciais quedas de potência e aumento do tempo de inatividade (*downtime*) em embarcações operando em modo DP, especialmente em operações offshore, elevando o risco de acidentes.

Além disso, combustíveis não *drop-in* exigem alterações estruturais em tanques e sistemas de combate a incêndio, enquanto a hibridização com baterias pode reduzir o espaço útil do convés, elevar custos de manutenção e demandar treinamento adicional das tripulações. Tecnologias como motores movidos a hidrogênio puro permanecem incipientes e não devem alcançar maturidade comercial antes de 2030.

Diante desse quadro, recomenda-se a criação de mecanismos de abatimento dos custos de descarbonização, permitindo, por exemplo, que tais despesas sejam

contabilizadas como parte das obrigações de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) previstas em cláusulas da ANP ou como requisitos de conteúdo local. Recomenda-se, ainda, o estímulo à eletrificação portuária por meio da implementação de sistemas OPS, que permitem o desligamento dos motores principais durante a atracação, reduzindo significativamente as emissões locais.

A ABEPH apoia a eletrificação de berços e terminais, enquanto a FENOP defende o fortalecimento da pesquisa, inovação e P&D, com propostas voltadas ao mapeamento da infraestrutura portuária, à identificação de gargalos tecnológicos e à criação de centros de inovação dedicados à descarbonização. Por fim, tanto a Marinha do Brasil quanto representantes da indústria e da academia enfatizam a importância da cooperação entre governo, academia e setor produtivo, de modo a garantir demanda consistente, produção sustentável de biocombustíveis certificados e preços acessíveis, condições essenciais para viabilizar a transição energética no transporte aquaviário nacional.

4.3.3 Arranjos institucionais e políticas públicas como resposta aos desafios da descarbonização marítima

O governo brasileiro desempenha um papel fundamental na promoção da descarbonização dos setores marítimo e portuário do país, o que é essencial para aumentar sua competitividade no cenário global. Para catalisar a transição energética, o governo precisa implementar políticas públicas robustas que incentivem a adoção de tecnologias de baixo carbono. Isso inclui a criação de regulamentações e padrões claros para a redução das emissões, além de oferecer incentivos fiscais e financeiros para empresas que investem em inovação tecnológica e infraestrutura verde. Programas de subsídios e financiamentos voltados para a modernização dos portos e a integração de combustíveis alternativos podem acelerar a transformação necessária para alinhar o setor às metas climáticas internacionais.

Sendo assim, a criação de instâncias formais de coordenação e planejamento tem contribuído para reduzir assimetrias de informação e alinhar expectativas entre os diferentes agentes do setor. Destaca-se, nesse contexto, a atuação do Ministério de Minas e Energia (MME), que instituiu o Subgrupo de Trabalho nº 05 (SubGT 05), no âmbito da Resolução CNPE nº 10/2024, com o objetivo de propor diretrizes e recomendações para a formulação de uma política nacional de combustíveis

sustentáveis de navegação. Essa iniciativa responde diretamente ao desafio da ausência de sinalização clara de longo prazo, ao buscar estruturar uma visão integrada sobre rotas tecnológicas, critérios de sustentabilidade e instrumentos de política pública.

De forma complementar, o Ministério de Portos e Aeroportos (MPOR) instituiu, por meio da Portaria Interministerial nº 632, de 5 de novembro de 2025, o Comitê de Descarbonização no Transporte Marítimo (CDTMar), reunindo, de maneira colaborativa, os Ministérios de Portos e Aeroportos, da Defesa, do Meio Ambiente e Mudança do Clima e de Minas e Energia. O CDTMar atua como instância de governança transversal, com a finalidade de integrar dados, estudos e diagnósticos sobre combustíveis sustentáveis, soluções tecnológicas e operacionais, além de subsidiar a elaboração, implementação e avaliação de políticas públicas. Ao promover o diálogo estruturado entre órgãos públicos, indústria, academia e demais stakeholders, o Comitê contribui para mitigar o problema clássico de coordenação entre infraestrutura, frota e oferta de combustíveis, um dos principais entraves à transição energética no setor.

Ainda no âmbito do MPOR, o lançamento do Programa Nacional de Descarbonização de Portos (PND Portos) e do Programa Nacional de Descarbonização da Navegação (PND-Navegação), por meio da Portaria nº 736/2025, representa um avanço relevante na superação das limitações estruturais e operacionais identificadas nos portos brasileiros. Esses programas buscam construir, de forma colaborativa, diretrizes para a modernização da infraestrutura portuária, a eletrificação de berços, a adoção de sistemas de Onshore Power Supply (OPS) e a preparação dos portos para operar com múltiplos combustíveis de baixo carbono, contribuindo para reduzir barreiras técnicas e de segurança associadas à introdução de novas rotas energéticas.

No segmento da cabotagem, o Programa BR do Mar, regulamentado pelo Decreto nº 12.555, de 2025, introduz incentivos para o afretamento de embarcações estrangeiras consideradas sustentáveis, criando um mecanismo indireto de renovação e modernização da frota. Embora os critérios de sustentabilidade dessas embarcações ainda estejam em definição pelo MPOR e pelo MDIC, a diretriz de estimular o uso progressivo de combustíveis de baixa emissão contribui para enfrentar

o desafio da obsolescência tecnológica da frota nacional e para acelerar a difusão de soluções já testadas em mercados mais maduros.

No plano internacional, a intensificação da agenda externa do MPOR e das Autoridades Portuárias, com a assinatura ou negociação de Memorandos de Entendimento e Declarações de Intenções com países e regiões estratégicas — como Noruega, Portugal, França, Singapura, China, Bélgica, Espanha, Canal do Panamá e Mercosul — tem sido decisiva para a promoção de corredores verdes marítimos. Esses acordos contribuem para reduzir incertezas regulatórias, harmonizar padrões técnicos e criar demanda coordenada ao longo de rotas específicas, enfrentando diretamente o desafio da fragmentação regulatória e da ausência de escala para viabilizar combustíveis alternativos na navegação de longo curso.

O apoio financeiro também desempenha papel central na mitigação dos elevados custos iniciais associados à descarbonização. A Chamada Pública de Planos de Negócios lançada pelo BNDES e pela FINEP, que recebeu 33 propostas do setor marítimo-aquaviário, totalizando R\$ 47 bilhões em investimentos solicitados, sinaliza a disposição do Estado em compartilhar riscos e viabilizar projetos intensivos em capital. Esse tipo de instrumento é particularmente relevante para enfrentar a barreira econômica associada à adoção de novas tecnologias, cujo retorno ainda é incerto em função da volatilidade dos preços de combustíveis e da ausência de mercados plenamente estabelecidos.

A ANTAQ, também tem um papel de extrema relevância para o desenvolvimento de estudos, planos e regulamentações que alavanquem essa transição com risco reduzido. No campo do planejamento e da produção de informação, iniciativas como o Inventário Aquaviário das Emissões de Gases de Efeito Estufa, desenvolvido pela ANTAQ [16], e o Roadmap do Transporte Aquaviário, elaborado pela EPE [87], fornecem bases técnicas essenciais para o desenho de políticas públicas, permitindo identificar prioridades, mensurar impactos e monitorar resultados. Em nível internacional, a atuação da Marinha do Brasil no âmbito da IMO tem buscado assegurar que os biocombustíveis nacionais sejam reconhecidos em critérios globais de sustentabilidade, além de defender mecanismos de conformidade mais flexíveis, em oposição a taxações fixas, reduzindo riscos de perda de competitividade para o setor.

Esses esforços institucionais têm sido acompanhados por avanços concretos do setor produtivo, da infraestrutura portuária e da academia, que vêm demonstrando a viabilidade técnica de diferentes rotas de descarbonização. Testes com biodiesel, etanol, HVO, metanol e hidrogênio, bem como investimentos em OPS, hibridização e eficiência energética, indicam que a combinação entre políticas públicas, coordenação institucional e inovação tecnológica é capaz de enfrentar, de forma progressiva, os desafios tecnológicos, operacionais e econômicos da transição energética no transporte marítimo. Nesse sentido, o fortalecimento da governança pública emerge como elemento-chave para transformar iniciativas pontuais em uma estratégia nacional consistente e de longo prazo para a descarbonização da navegação.

4.4 Síntese das Posições Brasileira no debate internacional

A presente seção examina temas técnicos centrais debatidos no âmbito dos debates internacionais. Os documentos apresentados pela delegação brasileira na IMO tratam de aspectos metodológicos e regulatórios fundamentais para a avaliação da intensidade de emissões de gases de efeito estufa dos combustíveis marítimos ao longo de todo o ciclo de vida (*well-to-wake*), incluindo a consideração de emissões indiretas, a definição de valores de referência, o enquadramento de combustíveis de emissões zero ou quase zero, o tratamento de emissões fugitivas e a necessidade de sistemas robustos de certificação. . No contexto das discussões da IMO, esses documentos buscam resguardar os interesses brasileiros e evitar distorções regulatórias ou metodológicas que possam afetar negativamente o país.

4.4.1 Mudança Indireta no Uso da Terra (ILUC)

Um dos temas que mais geram controvérsia no cenário internacional refere-se às emissões de gases de efeito estufa associadas às mudanças indiretas no uso da terra (*Indirect Land Use Change – ILUC*). Esse conceito diz respeito às emissões decorrentes da conversão indireta de áreas naturais, como florestas ou pastagens, para a produção de matérias-primas, por exemplo, destinadas à fabricação de biocombustíveis.

A visão predominantemente defendida pelos países membros da União Europeia não é agnóstica em relação ao tema e classifica os biocombustíveis baseados em culturas agrícolas como de alto risco de ILUC. No entanto, com o objetivo de desmistificar essa abordagem, a Comissão Coordenadora dos Assuntos da Organização Marítima Internacional (CCA-IMO), no âmbito da Marinha do Brasil — órgão responsável por coordenar a representação brasileira na IMO — submeteu o documento MEPC 83/7/3 [88]. O referido documento apresenta contribuições técnicas fundamentadas em estudos internacionais e em discussões recentes, inclusive no âmbito do G20, e propõe a adoção de uma abordagem baseada em risco para o tratamento do ILUC, em substituição ao uso de fatores fixos ou simplificações excessivas.

Esse debate técnico e normativo é enriquecido pelas contribuições de cientistas brasileiras, como a professora Glaucia Mendes Souza, Professora Titular do Instituto

de Química da Universidade de São Paulo (USP), Coordenadora do Programa de Pesquisa em Bioenergia da FAPESP (BIOEN) e Líder da Força-Tarefa de Bioenergia para a Descarbonização do Transporte da IEA Bioenergy [89]. Ao longo de diversas iniciativas, a professora tem contribuído de forma consistente para a desmistificação do tema, por meio da apresentação de publicações científicas, relatórios e documentos internacionais que demonstram que os impactos indiretos das mudanças no uso da terra — quando avaliados com metodologias baseadas em risco e em dados observáveis — são mais limitados e apresentam maior grau de nuance do que aqueles sugeridos por modelos estáticos de ILUC.

No factsheet elaborado pela professora Glaucia Mendes Souza e sua equipe [90], que consolida literatura científica recente e análises produzidas por entidades de reconhecido prestígio internacional, evidencia-se de forma clara que:

- os cálculos de ILUC dependem fortemente de parâmetros não observáveis e de pressupostos modelísticos, tornando-se pouco verificáveis empiricamente;
- os efeitos de ILUC, quando estimados com métodos robustos de LCA, mostram impactos menores do que frequentemente atribuídos a biocombustíveis agrícolas;
- a expansão de culturas como cana-de-açúcar e milho safrinha no Brasil tem apresentado baixo risco de conversão de vegetação natural, inclusive com valores de ILUC próximos de zero ou mesmo negativos em alguns cenários;
- e, portanto, a aplicação de indicadores de risco e metodologias transparentes e verificáveis é mais adequada para integrar o tratamento de ILUC nas políticas de contabilidade de emissões, como pretende a IMO em seu Net-Zero Framework

Ademais, o Brasil solicita que o tema seja formalmente encaminhado para análise e desenvolvimento adicional no âmbito do *GESAMP-LCA Working Group*, com o objetivo de aprimorar as diretrizes de avaliação de ciclo de vida da IMO e assegurar que o tratamento do ILUC seja incorporado de forma consistente ao *IMO Net-Zero Framework*.

4.4.2 Avaliação de Ciclo de Vida e Valores Padrão (LCA Guidelines)

Outro ponto focal dos debates internacionais diz respeito às Diretrizes de Avaliação de Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment – LCA Guidelines*) da IMO, em especial no que se refere à tabela de valores padrão (*default values*) utilizada para calcular a intensidade das emissões de gases de efeito estufa dos combustíveis marítimos no escopo *well-to-wake*. Esses valores padrão são essenciais para garantir a aplicabilidade prática das diretrizes e a comparabilidade global entre combustíveis. Contudo, caso não sejam suficientemente atualizados, transparentes e cientificamente robustos, podem resultar em estimativas imprecisas, distorcer a comparação entre diferentes rotas energéticas e comprometer a credibilidade ambiental do futuro marco regulatório da IMO.

A posição da IMO é de que os *default values* constituem um elemento indispensável das *LCA Guidelines*, especialmente para assegurar simplicidade, previsibilidade regulatória e viabilidade de implementação em escala global, inclusive em contextos nos quais dados específicos de cadeias de suprimento não estejam disponíveis. Ao mesmo tempo, a Organização reconhece a necessidade de que esses valores sejam continuamente refinados, revisados e alinhados com o avanço científico, garantindo consistência metodológica entre combustíveis fósseis, de transição e alternativos, bem como coerência com os objetivos do *IMO Net-Zero Framework*.

A posição do Brasil, expressa no documento MEPC 83/7/11, é de que a tabela de *default values* deve refletir de maneira mais precisa a diversidade de rotas de produção, matérias-primas e tecnologias existentes, evitando generalizações excessivas que possam penalizar injustamente determinados combustíveis ou regiões produtoras. O Brasil destaca que valores padrão inadequados podem gerar sinais econômicos distorcidos, influenciar negativamente decisões de investimento e comprometer a neutralidade tecnológica almejada pelo marco regulatório da IMO.

Como encaminhamentos, o documento brasileiro propõe o refinamento técnico da tabela de valores padrão com base em dados científicos atualizados e maior transparência quanto às premissas adotadas. Defende-se que o desenvolvimento e a revisão desses valores ocorram no foro técnico apropriado, em especial no âmbito do *GESAMP-LCA Working Group*, de forma iterativa e fundamentada em evidências. Ademais, o Brasil apoia a manutenção de mecanismos que permitam o uso de dados reais (*actual values*), quando disponíveis e devidamente verificados, assegurando que

os *default values* funcionem como referências conservadoras e transitórias, sem comprometer a integridade ambiental nem a viabilidade prática do sistema global de descarbonização do transporte marítimo.

4.4.3 Combustíveis de Emissões Zero ou Quase Zero (ZNZ Fuels)

Conforme apresentado na Seção 4.3, países tecnologicamente avançados e com forte inserção no setor marítimo, como Alemanha, Noruega, Suécia e Japão, tendem a apoiar a promoção de combustíveis de emissão zero ou quase zero (*Zero or Near-Zero GHG emissions fuels* – ZNZ fuels).

A principal preocupação associada a essa categoria é que, na ausência de uma definição clara, de critérios técnicos bem delimitados e de metodologias consistentes para a avaliação das emissões ao longo do ciclo de vida (*well-to-wake*), os ZNZ fuels possam gerar incertezas regulatórias, distorções de mercado e riscos à integridade ambiental. Ademais, tais lacunas podem dificultar decisões de investimento e comprometer a adoção em larga escala desses combustíveis pelo setor marítimo.

Essa problemática é tratada no documento MEPC 83/7/12, submetido conjuntamente por Brasil e China, que aborda a definição e o enquadramento regulatório dos combustíveis classificados como “Zero or Near-Zero GHG emissions” no contexto do futuro marco global de descarbonização da IMO. A posição de ambos os países é de que a definição de ZNZ fuels deve ser inclusiva, baseada em evidências científicas e orientada por uma abordagem de ciclo de vida, evitando restringir prematuramente o conjunto de opções tecnológicas disponíveis.

Brasil e China defendem que diferentes rotas de produção — incluindo combustíveis renováveis e de baixo carbono — possam ser consideradas elegíveis, desde que demonstrem desempenho ambiental compatível com os objetivos climáticos estabelecidos. Nesse sentido, alertam para os riscos de abordagens regulatórias que favoreçam tecnologias específicas sem respaldo técnico suficiente.

O documento propõe contribuições conceituais para a definição de ZNZ fuels, reforça a necessidade de alinhamento com as LCA Guidelines da IMO e solicita que o tema seja aprofundado nos fóruns técnicos competentes, de modo a subsidiar o desenvolvimento equilibrado do *IMO Net-Zero Framework*. Além disso, Brasil e China destacam a importância de estabelecer sinais regulatórios claros e previsíveis que incentivem investimentos em combustíveis e infraestruturas associadas aos ZNZ

fuels, especialmente em países em desenvolvimento, assegurando uma transição energética justa e globalmente equilibrada no transporte marítimo.

4.4.4 Emissões Fugitivas de Metano (Methane Slip)

As emissões fugitivas de metano, conhecidas como *methane slip*, associadas ao uso de gás natural liquefeito (GNL) como combustível marítimo, constituem outro ponto relevante de discussão nos debates internacionais. Embora o GNL seja frequentemente apresentado como uma opção de transição com menores emissões de CO₂ em comparação aos combustíveis fósseis convencionais, o metano possui um potencial de aquecimento global significativamente mais elevado no curto prazo. Assim, vazamentos e emissões não queimados ao longo de toda a cadeia — desde a produção e o transporte até a combustão a bordo — podem reduzir ou até mesmo anular os benefícios climáticos atribuídos ao GNL quando avaliados sob a perspectiva do ciclo de vida (*well-to-wake*).

A posição IMO é de que as emissões de metano devem ser tratadas de forma consistente e cientificamente robusta no âmbito das *LCA Guidelines*, assegurando que a avaliação da intensidade de gases de efeito estufa dos combustíveis reflita todos os impactos climáticos relevantes. A Organização reconhece a importância de considerar o *methane slip* tanto nos motores marítimos quanto nas etapas anteriores da cadeia de suprimento, ao mesmo tempo em que busca evitar abordagens excessivamente simplificadas que possam gerar resultados imprecisos ou dificultar a aplicação global das regras. Nesse contexto, a IMO tem encaminhado o tema para análise técnica detalhada nos grupos especializados, em particular no *GESAMP-LCA Working Group*.

A posição do Brasil, expressa no documento MEPC 83/7/14, é de que as emissões fugitivas de metano associadas ao GNL devem ser explicitamente reconhecidas e adequadamente quantificadas nas metodologias de avaliação de ciclo de vida da IMO. O país destaca que a subestimação do *methane slip* pode gerar uma percepção distorcida sobre o desempenho ambiental do GNL e produzir sinais regulatórios inadequados no contexto do *IMO Net-Zero Framework*, especialmente quando comparado a outros combustíveis alternativos.

Como encaminhamentos, o documento brasileiro apresenta evidências técnicas e referências científicas sobre a relevância climática do metano, ressalta a

necessidade de adoção de valores de emissão mais representativos nas *LCA Guidelines* e solicita que o tema seja aprofundado tecnicamente no âmbito do *GESAMP-LCA Working Group*. O Brasil defende que o aprimoramento das metodologias de LCA inclua tanto o refinamento dos valores padrão quanto a possibilidade de utilização de dados reais (*actual values*), quando disponíveis e devidamente verificados, assegurando que o tratamento do GNL seja consistente com os objetivos de longo prazo de descarbonização e com a integridade ambiental do regime global da IMO.

4.4.5 Etanol como Combustível Marítimo

Apesar de o etanol já ser amplamente produzido e utilizado como combustível em outros setores, sua aplicação no transporte marítimo internacional ainda enfrenta lacunas regulatórias, ausência de parâmetros específicos nas *LCA Guidelines* e incertezas quanto ao seu enquadramento no futuro *IMO Net-Zero Framework*, o que pode limitar seu potencial de contribuição para a redução de emissões de gases de efeito estufa.

A problemática abordada no documento MEPC 83/7/17, submetido conjuntamente pelo Brasil e pela *International Bunker Industry Association* (IBIA), refere-se à necessidade de reconhecimento e de enquadramento regulatório adequado do etanol como combustível marítimo no contexto das políticas de descarbonização da IMO.

A Organização Marítima Internacional reconhece a importância de ampliar o portfólio de combustíveis de baixa ou zero emissão, mas adota uma abordagem cautelosa e baseada em evidências científicas, remetendo o desenvolvimento de parâmetros específicos aos fóruns técnicos competentes, em particular aqueles responsáveis pelas diretrizes de avaliação de ciclo de vida e pelos aspectos de segurança operacional.

A posição do Brasil e da IBIA, expressa no MEPC 83/7/17, é de que o etanol pode desempenhar um papel relevante como combustível marítimo, especialmente como opção de transição e, em determinadas rotas de produção, como combustível de baixa ou quase zero emissão. Os proponentes destacam vantagens como a ampla disponibilidade do etanol, a existência de infraestrutura já estabelecida em alguns países, o potencial de produção sustentável e a possibilidade de reduções

significativas de emissões quando avaliado sob a perspectiva do ciclo de vida, desde que consideradas matérias-primas e práticas produtivas adequadas.

Como encaminhamentos, o documento apresenta informações técnicas sobre o uso do etanol no transporte marítimo, analisa suas características ambientais e operacionais e solicita que o combustível seja formalmente incorporado às *LCA Guidelines* da IMO, incluindo o desenvolvimento de valores de referência apropriados para a avaliação de emissões. Ademais, Brasil e IBIA requerem que o tema seja aprofundado nos fóruns técnicos da Organização, de modo a viabilizar a elaboração de regras claras, baseadas em ciência, que permitam o uso seguro e ambientalmente consistente do etanol como parte do conjunto de soluções para a descarbonização do transporte marítimo internacional.

4.4.6 Certificação de Combustíveis Marítimos

A metodologia de certificação proposta pela IMO, ilustrada na figura a seguir, é concebida como um elemento central para a implementação das medidas de redução de emissões de gases de efeito estufa no âmbito do *IMO Net-Zero Framework*. A certificação visa assegurar a correta aplicação das *LCA Guidelines*, permitindo a comprovação transparente, verificável e rastreável da intensidade de emissões dos combustíveis marítimos ao longo de todo o ciclo de vida (*well-to-wake*). Para a IMO, sistemas de certificação devem ser globais, cientificamente robustos, auditáveis e administrativamente viáveis, de modo a garantir comparabilidade entre combustíveis e previsibilidade regulatória, evitando ao mesmo tempo a fragmentação normativa.

O documento ISWG-GHG 18/2/17, submetido pelo Brasil em conjunto com outros coautores, destaca que a ausência de critérios claros e harmonizados de certificação, verificação e rastreabilidade pode comprometer a credibilidade ambiental do futuro marco regulatório da IMO e gerar insegurança regulatória para Estados-Membros, operadores e produtores de combustíveis. Nesse contexto, o Brasil defende que a certificação deve assegurar a integridade ambiental sem criar barreiras desnecessárias ao comércio internacional ou à participação de países em desenvolvimento.

A posição brasileira enfatiza a necessidade de uma abordagem equilibrada, que combine rigor técnico e viabilidade prática, preservando a neutralidade tecnológica e a proporcionalidade regulatória. O Brasil alerta que sistemas

excessivamente complexos ou restritivos podem excluir cadeias de suprimento legítimas, elevar custos de conformidade e distorcer a concorrência entre combustíveis. Como encaminhamento, o documento propõe princípios para o desenvolvimento de um arcabouço de certificação no âmbito da IMO, incluindo transparência, verificação independente, rastreabilidade ao longo da cadeia de valor e coerência com as *LCA Guidelines*, além do reconhecimento ou harmonização de esquemas de certificação existentes que atendam a critérios mínimos acordados internacionalmente.

Essa abordagem busca apoiar a implementação eficaz do *IMO Net-Zero Framework*, assegurando credibilidade ambiental, previsibilidade regulatória e uma transição energética justa e inclusiva no transporte marítimo internacional.

Os debates e propostas apresentados nesta seção demonstram que a efetividade ambiental e a legitimidade regulatória do *IMO Net-Zero Framework* dependem de metodologias de avaliação de ciclo de vida robustas, transparentes e continuamente aprimoradas. Questões como ILUC, valores padrão de emissões, definição de combustíveis de emissões zero ou quase zero, emissões fugitivas de metano, reconhecimento de novos combustíveis e certificação evidenciam a necessidade de equilíbrio entre rigor técnico, viabilidade prática e neutralidade tecnológica. A atuação do Brasil, frequentemente em articulação com outros Estados-Membros, reforça a importância de assegurar comparabilidade entre combustíveis, evitar distorções regulatórias e promover uma transição energética justa e inclusiva. O encaminhamento consistente desses temas aos fóruns técnicos apropriados, em especial ao *GESAMP-LCA Working Group*, mostra-se essencial para consolidar um regime global de descarbonização que seja ambientalmente íntegro, previsível e aplicável a diferentes realidades nacionais.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Das conclusões

O relatório do Subgrupo de Trabalho nº 05 (SubGT-05), instituído pela Resolução CNPE nº 10/2024, demonstra que o Brasil reúne condições objetivas para assumir um papel de destaque na descarbonização do transporte marítimo internacional. Embora a transição energética no setor aquaviário envolva desafios tecnológicos, regulatórios e logísticos relevantes, o estudo evidencia que, nos curto e médio prazos, os combustíveis líquidos sustentáveis constituem a alternativa mais viável para o cumprimento das metas estabelecidas pela Organização Marítima Internacional (IMO), especialmente para a frota atualmente em operação.

Nesse contexto, os biocombustíveis despontam como a solução prioritária para o atendimento das metas do IMO *Net Zero Framework* no horizonte de curto e médio prazos, em razão de sua elevada prontidão tecnológica, baixo requerimento de investimentos incrementais (CAPEX), ampla disponibilidade nacional e plena compatibilidade com a infraestrutura existente de produção, distribuição e abastecimento. O foco não se limita ao biodiesel e ao Óleo Vegetal Hidrotratado (HVO/Green Diesel), mas inclui de forma estratégica o etanol — particularmente aquele proveniente de rotas avançadas e de baixo impacto ambiental — que se destaca por sua capacidade de apresentar resultados de Análise de Ciclo de Vida (LCA) compatíveis, e em alguns casos aderentes, aos limites de emissões zero ou quase zero (ZNZ) definidos pela IMO.

O novo arcabouço regulatório internacional cria, assim, um ambiente favorável à inserção competitiva dos biocombustíveis brasileiros no bunker marítimo global. Combustíveis como o biodiesel produzido a partir de resíduos e gorduras animais, o HVO e o etanol de baixo carbono apresentam intensidades de emissão alinhadas às metas internacionais de redução de gases de efeito estufa, reforçando a atratividade do Brasil não apenas como fornecedor, mas como ator estratégico na transição energética do transporte marítimo.

Ao mesmo tempo, o relatório identifica que a consolidação desse protagonismo dependerá da superação de entraves estruturais relevantes, em especial aqueles associados à infraestrutura portuária, à adaptação dos sistemas de tancagem e abastecimento e à harmonização regulatória. Torna-se fundamental assegurar a compatibilidade entre políticas nacionais — como o *RenovaBio* — e os critérios

internacionais de LCA adotados pela IMO, de modo a refletir adequadamente as especificidades da produção brasileira, conferir previsibilidade aos investimentos e evitar distorções na avaliação ambiental dos biocombustíveis nacionais.

Dessa forma, a estratégia brasileira para combustíveis marítimos sustentáveis deve ir além de um posicionamento defensivo, buscando consolidar o país como um hub global de combustíveis renováveis de próxima geração. Isso exigirá ações coordenadas entre governo, setor produtivo e instituições de pesquisa, com foco em investimentos em infraestrutura, estímulo à formação de polos industriais e tecnológicos em portos estratégicos e criação de um ambiente regulatório estável e transparente que viabilize a expansão em escala comercial de soluções energéticas de baixo carbono.

Em conclusão, o SubGT-05 reafirma que o Brasil dispõe de vantagens comparativas únicas — recursos naturais abundantes, base industrial consolidada e elevado conhecimento técnico — para liderar a transição rumo a uma economia marítima de baixo carbono. O êxito desse processo dependerá da capacidade de transformar tais vantagens em políticas públicas eficazes, investimentos estruturantes e integração entre a oferta nacional de combustíveis sustentáveis e a demanda internacional, assegurando competitividade, sustentabilidade e protagonismo geopolítico ao país no novo cenário energético global.

5.2 Das recomendações

Baseado no benchmarking internacional, foi possível concluir que a integração do planejamento estratégico com metas de descarbonização e conformidade internacional deve avançar em sintonia com incentivos econômicos e fiscais capazes de reduzir o custo de adoção de combustíveis e tecnologias limpas. Ao mesmo tempo, torna-se essencial fortalecer a regulamentação de combustíveis e os sistemas de certificação de sustentabilidade, assegurando reduções reais de emissões ao longo de todo o ciclo de vida. Esse progresso também depende do desenvolvimento de infraestrutura portuária adequada, incluindo eletrificação e instalações de abastecimento para combustíveis alternativos. Paralelamente, a promoção da inovação tecnológica e da pesquisa — com foco em combustíveis avançados, hidrogênio verde e retrofits de frotas — deve ser acompanhada do estímulo à produção nacional de combustíveis limpos, contribuindo para a consolidação de

mercados internos e para a redução da dependência de fontes fósseis. Por fim, uma abordagem multissetorial e tecnologicamente diversa, que permita a coexistência de biocombustíveis, hidrogênio, amônia e eletrificação, garante maior flexibilidade e escalabilidade ao processo de transição energética.

No âmbito das consultas realizadas, também foi possível identificar as principais preocupações e sugestões apresentadas pelos setores envolvidos. A transição para os Combustíveis Sustentáveis de navegação no Brasil é dificultada por uma série de desafios, incluindo o alto custo dos combustíveis verdes — entre 30% e 40% superior ao dos combustíveis convencionais — e os custos de adaptação das embarcações; o risco de perda de competitividade das exportações e da cabotagem diante do custo da adoção do combustível marítimo sustentável, da taxaço de carbono e de distorçoões tributárias; a inadequaçoão da infraestrutura portuária e a ausência de uma logística padronizada. Agravam esse cenário os desafios tecnológicos e de segurança, como a toxicidade da amônia; e as barreiras regulatórias, entre elas a falta de alinhamento entre o RenovaBio e as normas da IMO.

Para sistematizar as propostas destinadas ao CNPE, elas foram organizadas, em sete pilares de forma a facilitar a análise, a priorizaçoão e a implementaçoão das ações recomendadas.

O primeiro pilar, dedicado aos “mandatos”, reúne premissas que orientam, entre outros pontos, a definiçoão de um mandato de reduçoão de emissões no setor de navegaçoão. O segundo pilar aborda as “metas de descarbonizaçoão, o mercado nacional (pequenas embarcaçoões e navegaçoão interior não sujeitos às normas internacionais) e a IMO”, consolidando todos os aspectos relacionados às metas climáticas formais, ao alinhamento internacional e aos mecanismos estabelecidos pela organizaçoão. O terceiro pilar trata do “Financiamento de projetos e PD&I”, definindo diretrizes governamentais para incentivar iniciativas voltadas ao desenvolvimento do setor e dos combustíveis sustentáveis de navegaçoão no Brasil. Já os pilares quarto, quinto e sexto reúnem, respectivamente, premissas referentes à “tributaçoão”, “qualidade e certificaçoão” e “governança”, entre outros temas. Por fim o pilar de Logística e Infraestrutura tem como diretrizes e ações destinadas ao desenvolvimento, à modernizaçoão e à integraçoão da infraestrutura portuária e da logística de navegaçoão, assegurando condiçoões operacionais, técnicas e regulatórias adequadas para a transição energética e para a competitividade do transporte

marítimo sustentável. As propostas elaboradas a partir do processo de participação social estão consolidadas no Quadro 04.**Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Quadro 10. Relação de propostas ao CNPE elaboradas com base na participação social

Eixo	Nº da Proposta	Descrição da Proposta
Mandatos	1	Adoção de metas de redução de emissões (i) no transporte aquaviário e (ii) em concessões e operações portuárias, incluindo seus impactos nas emissões da navegação.
	2	Implementar de forma progressiva o uso de OPS por navios compatíveis em portos que disponham dessa infraestrutura, assegurando redução real de emissões durante a atracação, com priorização por tipo de navio e monitoramento contínuo.
	3	A busca pela adoção do Mecanismo Flexível de Conformidade da IMO (reporting, monitoramento, indicadores).
	4	Implementação de mecanismos baseados em mercado para comercialização como <i>book and claim</i> .
	5	Mecanismos de offtake e garantias de demanda para estimular produção.
Metas de Descarbonização e IMO	6	Integração entre o RenovaBio e metodologias definidas pela IMO.
	7	Estabelecimento de corredores marítimos verdes internacionais e nacionais, conectados às rotas exigidas pela IMO para navios de longo curso e as necessidades brasileiras de descarbonização da cabotagem.
	8	Criação de programa estratégico de fomento e capacitação aos produtores de biocombustíveis para atender aos esquemas de certificação da IMO.
Financiamento de projetos PD&I	9	Linhas de crédito verde via Fundo Marinha Mercante, Fundo Clima e instituições públicas federais de fomento para retrofit, combustíveis aquaviários sustentáveis, e adequação de infraestrutura.
	10	Incentivo a projetos de P&DI voltados a soluções tecnológicas para a descarbonização portuária e de embarcações, bem como ao desenvolvimento de combustíveis aquaviários sustentáveis, incluindo hidrogênio, metanol e amônia de baixo carbono, biocombustíveis líquidos como etanol, biodiesel e bioGL.
	11	Apoio a projetos-piloto de hidrogênio, metanol e amônia de baixo carbono, biocombustíveis líquidos como etanol, biodiesel e bioGL. em portos exportadores e hubs portuários, incluindo suporte à certificação e à validação tecnológica.
	12	Criação do Programa Nacional de Capacitação Técnica ligado a combustíveis aquaviários sustentáveis.
	13	Incentivo à criação de Centros de P&DI para setor marítimo.

Quadro 11. Relação de propostas ao CNPE elaboradas com base na participação social(continuação)

Eixo	Nº da Proposta	Descrição da Proposta
Tributação	14	Diferencial tributário para combustíveis aquaviários sustentáveis e incentivo tributário para investimento em equipamentos e infraestrutura portuária e embarcações com foco na descarbonização do segmento marítimo
	15	Avaliação de mecanismos de precificação de carbono integrados ao RenovaBio
Qualidade e Certificação	16	Implementação de Selo Verde Portuário e de embarcações como certificação de desempenho ambiental da infraestrutura.
	17	Criação de mapa público nacional de oferta, demanda e infraestrutura logística de combustíveis aquaviários sustentáveis
	18	Adoção da metodologia <i>well-to-wake</i> para certificação de emissões em alinhamento com a diretrizes da IMO.
	19	Recomendar a ANP a revisão e/ou atualização do arcabouço regulatório referente as especificações técnicas e comercialização dos combustíveis aquários fóssil, sustentáveis e blends.
Governança e outros temas	20	Atualização da Lei do Combustível do Futuro, para incorporação do capítulo do Programa Nacional de combustíveis Sustentáveis
	21	Incentivo a Cooperação Internacional pública e privada incluindo atuação coordenada com outros países em fóruns internacionais e na IMO.
	22	Adoção de estratégia diferenciada para navegação internacional, navegação de cabotagem e hidroviária.
	23	Implementação do Programa Nacional de descarbonização de Portos e do Programa Nacional de descarbonização da navegação.
Logística e Infraestrutura	24	Realização de estudo oficial do governo para a determinação das cadeias logísticas viáveis para o suprimento de combustíveis destinados aos corredores marítimos verdes.
	25	Criação de planejamento coordenado entre a adoção de corredores verdes e a criação de cadeias logísticas.
	26	Desenvolvimento de políticas públicas e diretrizes regulatórias de incentivo a criação de cadeias logísticas para suprimento dos corredores marítimos verdes.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] IMO, “Assuntos da Organização Marítima Internacional – Transição Energética no Mar: as Decisões Que Moldarão o Transporte Marítimo das Próximas Décadas,” 2020.
- [2] icct, “The potential of Brazilian ports as renewable marine fuel bunkering hubs,” 2025.
- [3] ANTAQ, “Diagnóstico de Descarbonização, Infraestrutura e aplicações do Hidrogênio nos Portos,” 2023.
- [4] ANTAQ, “Anuário 2023. Estatísticas dos portos e das navegações em 2023,” 7 Fevereiro 2024. [Online]. Available: <https://www.gov.br/antag/pt-br/central-de-conteudos/publicacoes-da-antag/Anurio2023vfcompleta.pdf>. [Acesso em 18 Novembro 2024].
- [5]
- [6] OCEANPACT, “Acelerando a descarbonização portuária e marítima no Brasil,” 2025. [Online]. Available: <https://oceanpact.com/wp-content/uploads/2025/05/Acelerando-a-descarbonizacao-portuaria-e-maritima-no-Brasil.pdf>. [Acesso em 05 fev 2026].
- [7] EPE, “Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2024,” 2025.
- [8] MAERSK, “New fuel trial on Laura Mærsk: ethanol-methanol blend,” 2025. [Online]. Available: <https://www.maersk.com/news/articles/2025/12/05/new-fuel-trial-laura-maersk-ethanol-methanol-blend>. [Acesso em 26 jan 2026].
- [9] IEA, “Carbon Accounting for Sustainable Biofuels. Paris: International Energy Agency,” 2024. [Online]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/79f31c02-0efe-41ca-ac15-9d076bf2cd29/CarbonAccountingforSustainableBiofuels.pdf>. [Acesso em jan 26 2026].
- [10] FGV ENERGIA, “GEOPOLÍTICA DA ENERGIA DE BAIXO CARBONO,” 2024. [Online]. Available: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/alta_caderno_geopolitica_da_energia_de_baixo_carbono.pdf. [Acesso em 05 fev 2026].
- [11] F. M. d. Carvalho, R. Schaeffer, J. Portugal-Pereira, E. Müller-Casseres, M. R. P. d. Carvalho, T. d. F. Nogueira, C. B. Fonte, P. R. R. Rochedo e H. K. Wei, “Perspectivas de produção de combustíveis marítimos de emissão,” *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2020*, 2020.
- [12] A. B. Aguiar, J. V. M. Cardoso e L. Guitarrari, “TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO TRANSPORTE MARÍTIMO,” FGV ENERGIA, 2023.

- [13] A. D. BRITO, “Transição energética no setor de transporte marítimo internacional e as alternativas para mitigação das emissões do setor no Brasil no contexto da IMO 2020,” 2021.
- [14] “Relatório do subcomitê de combustíveis marítimo,” 2025.
- [15] 2020.
- [16] ANTAQ & CNT, “Inventário CNT de Emissões de Gases do Efeito Estufa do Setor de Transporte,” 2025. [Online]. Available: <https://cnt.org.br/documento/859886b9-268f-4463-8bba-f8e880bc43b2>. [Acesso em 28 jan 2026].
- [17] icct; Carmen Silvia Câmara Araujo, “FREIGHT IN BRAZIL - An assessment and outlook for improving environmental performance”.
- [18] M. K. A. d. Silva e A. S. Júnior, “BARREIRAS RELACIONADAS À LEGISLAÇÃO,” 2024.
- [19] K. G. A. X. M. MARICRUZ FUN SANG CEPEDA, “The potential of Brazilian ports as renewable marine fuel bunkering hubs,” icct, 2025.
- [20] F. D. F. M. T. M. D. e. S. M. Claudia Sousa, “Distribuição de combustíveis marítimos no Brasil, em conformidade com o IMO 2020: oportunidades e desafios para o Brasil,” 2025.
- [21] MME, “Relatório do Subcomitê de Combustíveis Marítimos,” <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/dbio/projeto-de-lei-528-2020/subcomites-1/combustiveis-maritimos-1/documentos-subcomite/relatorio-subcomite-combustiveis-maritimos.pdf/view>, 2023.
- [22] WayCarbon, “Curva MAC: o que é e como pode auxiliar na estratégia de redução de emissões?,” 2022. [Online]. Available: <https://waycarbon.com/pt/blog/curva-mac-o-que-e-e-como-pode-auxiliar-na-estrategia-de-reducao-de-emissoes>. [Acesso em jan 28 2026].
- [23] BNDES, “Rebocadores Portuários e Marítimos,” Setembro 2017. [Online]. Available: <https://bibliotecadigital.economia.gov.br/handle/123456789/527292>. [Acesso em 07 Abril 2025].
- [24] 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].
- [25] 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>.

- [26] Abeam/Syndarma, “Frota de Embarcações de Apoio Marítimo no Brasil,” Dezembro 2024. [Online]. Available: <https://abeam.org.br/>. [Acesso em 27 Março 2025].
- [27] ANTAQ, “Painel Estatístico Aquaviário,” 2024. [Online]. [Acesso em 19 Novembro 2024].
- [28] 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].
- [29] Petrobras, “Combustíveis Marítimos - informações técnicas,” 2021. [Online]. Available: www.petrobras.com.br. [Acesso em 25 Novembro 2024].
- [30] 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].
- [31] 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].
- [32] Transpetro, “Informações em atendimento à ANP,” 2025. [Online]. Available: <https://transpetro.com.br/>. [Acesso em 25 Março 2025].
- [33] 3. Petroleum, “Histórico de volumes mensais,” 2025. [Online]. Available: <https://operacoesmaritimas.bravaenergia.com/>. [Acesso em 25 Março 2025].
- [34] 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].
- [35] UNCTAD, “unctad.org,” Setembro 2023. [Online]. Available: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023>. [Acesso em 29 Setembro 2023].
- [36] DNV, “Maritime Forecast to 2050,” DNV, Høvik, Norway, 2024.
- [37] CLARKSONS, 2024. [Online]. Available: <https://www.clarksons.com/>. [Acesso em 7 Fevereiro 2024].
- [38] 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].

[39] 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.

[40] 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.

[41] DNV, “DNV,” DNV, 2019 October 2019. [Online]. Available: <http://www.dvn.com.br>. [Acesso em 23 Janeiro 2024].

[42] 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. .

[43] 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,”](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].

[44] 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.

[45] 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>.

[46] 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].

- [47] 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].
- [48] R. Borher e A. Pinho Alho, *UMA METODOLOGIA DE ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS PARA A REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ POR NAVIOS*, UFRJ, 2022.
- [49] 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].
- [50] I. Bioenergy, IEA Bioenergy, 2025. [Online]. Available: <https://task33.ieabioenergy.com/database/>. [Acesso em 31 março 2025].
- [51] A. Foretich, G. G. Zaimes, T. R. Hawkins e E. Newes, “Challenges and opportunities for alternative fuels in the,” *Maritime Transport Research*, 2021.
- [52] MPA Singapore, 12 January 2024. [Online]. Available: <https://www.mpa.gov.sg/>. [Acesso em 23 Fevereiro 2024].
- [53] 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].
- [54] 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>.
- [55] 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].
- [56] 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].

- [57] Global Maritime Forum, “Annual Progress Report on Green Shipping Corridors,” Global Maritime Forum, Copenhagen, 2022.
- [58] DNV, “TECHNICAL REGULATORY NEWS No. 17/2023 – STATUTORY,” Julho 2023. [Online]. Available: <https://www.dnv.com/maritime>.
- [59] 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].
- [60] 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].
- [61] O. Energy, “Rotterdam-Singapore green corridor conducts pilot liquefied bio-methane 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].
- [62] “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].
- [63] 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].
- [64] IEA, “International Energy Agency,” IEA, 11 July 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org>. [Acesso em 7 Fevereiro 2024].
- [65] POSEIDON PRINCIPLES, “POSEIDON PRINCIPLES,” POSEIDON PRINCIPLES, [Online]. Available: <https://www.poseidonprinciples.org>. [Acesso em 7 Fevereiro 2024].
- [66] coZEV, “Cargo Owners for Zero Emission Vessels,” coZEV, [Online]. Available: <https://www.cozev.org/>. [Acesso em 7 Fevereiro 2024].
- [67] GLOBAL MARITIME FORUM, “GLOBAL MARITIME FORUM,” GLOBAL MARITIME FORUM, [Online]. Available: <https://www.globalmaritimeforum.org/getting-to-zero-coalition>. [Acesso em 7 Fevereiro 2024].

- [68] IMO, “Improving the energy efficiency of ships,” 2023b. [Online]. Available: https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/improving%20the%20energy%20efficiency%20of%20ships.aspx?utm_source. [Acesso em 06 fev 2026].
- [69] IMO, “EEXI and CII - ship carbon intensity and rating system,” 2022. [Online]. Available: https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/eexi-cii-faq.aspx?utm_source. [Acesso em 06 fev 2026].
- [70] M. TADROS, M. VENTURA e C. GUEDES SOARES, “Review of the IMO Initiatives for Ship Energy Efficiency and Their Implications.,” *Journal of Marine Science and Application*, pp. 662-680, 2023.
- [71] 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.clscn.2021.100021>, 2022.
- [72] ESI, “Environmental Ship Index,” [Online]. Available: <https://environmentalshipindex.org/>.
- [73] ESI, “Environmental Ship Index,” Environmental Ship Index, [Online]. Available: <https://www.environmentalshipindex.org/>. [Acesso em 8 Fevereiro 2024].
- [74] Governo do Maranhão, “Governo do Maranhão,” Governo do Maranhão, 12 Janeiro 2024. [Online]. Available: <https://www.ma.gov.br/>. [Acesso em 15 Fevereiro 2024].
- [75] Alianza Net-Zero MAR, “Alianza Net-Zero MAR,” Alianza Net-Zero MAR, 2024. [Online]. Available: <https://netzeromar.org/>. [Acesso em 15 Fevereiro 2024].
- [76] 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].
- [77] 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].
- [78] EPE, “Balanço Energético Nacional - BEN,” 2024. [Online]. Available: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>.
- [79] EPE, “Balanço Energético Nacional 2024 - Ano base 2023,” 2024. [Online]. [Acesso em 2024].

- [80] IMO, “Module 5: Ship Port Interface for Energy Efficiency,” 2016. [Online]. Available: https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/M5%20ship-port%20interface%20final.pdf?utm_. [Acesso em 05 fev 2026].
- [81] L. Paddison e A. Freedman, “US helps sink world’s first global carbon tax after threatening sanctions against countries supporting it,” CNN, 2025. [Online]. Available: <https://edition.cnn.com/2025/10/17/climate/imo-shipping-carbon-tax-trump>. [Acesso em 05 fev 2026].
- [82] ABAC, “ SubGT 05 - Combustível Aquaviário Sustentável,” MME, 2025. [Online]. Available: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/gt-rcnpe-10-2024/subgrupos/subgt05/2025-05-23-apresentacao-abac-2025.pdf>. [Acesso em fev 2026].
- [83] icc Brasil, “Oportunidades para o Brasil em Mercado de Carbono,” 2023.
- [84] ABEPH, “ SubGT 05 - Combustível Aquaviário Sustentável,” 2025. [Online]. Available: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/gt-rcnpe-10-2024/subgrupos/subgt05/2025-05-07-apresentacao-abeph-beatriz-gallotti-subgt05.pdf>. [Acesso em 06 fev 2026].
- [85] SYNDARMA & Abeam, “SubGT 05 - Combustível Aquaviário Sustentável,” 2025. [Online]. Available: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/gt-rcnpe-10-2024/subgrupos/subgt05/2025-06-27-subgt-05-apresentacao-syndarma-e-abeam.pdf>. [Acesso em 06 fev 2026].
- [86] Clia Brasil, “SubGT 05 - Combustível Aquaviário Sustentável,” 2025. [Online]. Available: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/gt-rcnpe-10-2024/subgrupos/subgt05/apresentacao-minas-e-energia-2025-clia.pdf>. [Acesso em 06 fev 2026].
- [87] EPE, “Caderno - Roadmap do Transporte Aquaviário,” 2024.
- [88] IMO, “MEPC 83,” 11 April 2025. [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/mediacentre/meetingsummaries/pages/mepc-83rd-session.aspx>. [Acesso em 17 Abril 2025].
- [89] INSTITUTO E+ TRANSIÇÃO ENERGÉTICA, “Os biocombustíveis são importantes alternativas para a descarbonização eficaz e imediata dos sistemas de transporte.” 2025. [Online]. Available: <https://emaisenergia.org/publicacao/os-biocombustiveis-sao-importantes-alternativas-para-a-descarbonizacao-eficaz-e-imediata-dos-sistemas-de-transporte/>. [Acesso em 06 fev 2026].

- [90] BIOEN-FAPESP, “Biofuels as an immediate and effective solution for decarbonization of transportation – Factsheet.,” 2025. [Online]. Available: <https://bioenfapesp.org/biofuels-as-an-immediate-and-effective-solution-for-decarbonization-of-transportation-factsheet/>. [Acesso em 04 fev 2026].
- [91] E. Commission, “European Commission - Energy - Transport,” European Commission, 06 September 2022. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/emissions-free-sailing-full-steam-ahead-ocean-going-shiping>. [Acesso em 05 October 2023].
- [92] UNCTAD, “Review of Maritime Transport 2024,” United Nations publication, Geneva, 2024.
- [93] 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].
- [94] IMO, “Guidelines on life cycle GHG intensity of marine fuels (LCA Guidelines),” [Online]. Available: <https://wwwcdn.imo.org/>. [Acesso em 27 Fevereiro 2024].
- [95] HELLENIC SHIPPING NEWS, 21 June 2021. [Online]. Available: <https://www.hellenicshippingnews.com/>. [Acesso em 16 Fevereiro 2024].
- [96] DNV, “DNV,” DNV, 9 January 2024. [Online]. Available: <https://www.dnv.com/>. [Acesso em 7 Fevereiro 2024].
- [97] 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].
- [98] Nautilus Shipping, “Marine Propulsion Systems,” 16 December 2022. [Online]. Available: <https://www.nautilusshipping.com/marine-propulsion-systems>. [Acesso em 28 Fevereiro 2024].
- [99] 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].
- [100] 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].

- [101] 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].
- [102] 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].
- [103] 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].
- [104] 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].
- [105] 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].
- [106] L. van Biert e K. Visser, “Fuel cells systems for sustainable ships,” em *Sustainable Energy Systems on Ships*, Elsevier, 2022, pp. 81-121.
- [107] 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.
- [108] EIDESVIK OFFSHORE ASA, “Eidesvik.no,” Eidesvik, 2024. [Online]. Available: <http://eidesvik.no>. [Acesso em 24 Janeiro 2024].
- [109] VALE, “Vale,” Vale.com, 30 junho 2021. [Online]. Available: <https://vale.com/>. [Acesso em 1 Dezembro 2023].
- [110] Marine Insight, “Marine Insight,” Marine Insight, 24 January 2021. [Online]. Available: <https://www.marineinsight.com/>. [Acesso em 30 January 2024].
- [111] 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.

- [112] 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.
- [113] 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].
- [114] IEEE, "The Case For Nuclear Cargo Ships," 20 January 2024. [Online]. Available: <https://spectrum.ieee.org>. [Acesso em 1 Fevereiro 2024].
- [115] EPE, "Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis 2019," Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2020a.
- [116] 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.
- [117] 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.
- [118] EPE, "Combustíveis Alternativos para motores do ciclo Diesel," Rio de Janeiro, 2020a.
- [119] ANP, "RenovaBio," Rio de Janeiro, 2021f.
- [120] 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].
- [121] 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].
- [122] 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 October 2023].
- [123] 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-refueled-and-fueled/>. [Acesso em 17 October 2023].

- [124] 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].
- [125] 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].
- [126] 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].
- [127] 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].
- [128] FMC, “First Movers Coalition,” FMC, 2023. [Online]. Available: <https://www.weforum.org/first-movers-coalition>. [Acesso em 16 October 2023].
- [129] 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].
- [130] 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.
- [131] 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].
- [132] 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].

- [133] 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-calculo-da-pegada-de-carbono-para-iniciar-plano-para-descarbonizacao>. [Acesso em 2024 Novembro 7].
- [134] IMO, “International Maritime Organization,” IMO, 2024. [Online]. Available: <https://www.imo.org/>. [Acesso em 15 Fevereiro 2024].
- [135] 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].
- [136] 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].
- [137] 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].
- [138] Porto do Itaqui, “Porto do Itaqui,” Porto do Itaqui, 28 Setembro 2023. [Online]. Available: <https://www.portodoitaqui.com/>. [Acesso em 16 Fevereiro 2024].
- [139] 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].
- [140] EPE, “Plano Nacional de Energia,” [Online]. Available: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034>.
- [141] 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].
- [142] 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].

- [143] 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/>.
- [144] 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/>.
- [145] IBP, " SubGT 05 - Combustível Aquaviário Sustentável," ABRIL 2025. [Online]. Available: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/gt-rcnpe-10-2024/subgrupos/subgt05/2024_04_04___apresentacao_ibp_comb_maritimos_descarbonizacao___jorge_carmelo.pdf.
- [146] CENTRONAVE, "CENTRONAVE estima um prejuízo anual da ordem US\$ 21 bilhões para o comércio exterior brasileiro," JULHO 2024. [Online]. Available: <https://centronave.org.br/centronave-estima-um-prejuizo-anual-da-ordem-us-21-bilhoes-para-o-comercio-exterior-brasileiro/>.
- [147] CENTRONAVE, " SubGT 05 - Combustível Aquaviário Sustentável," MAIO 2025. [Online]. Available: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/gt-rcnpe-10-2024/subgrupos/subgt05/apresentacao-centronave.pdf>.
- [148] M. d. P. e. Aeroportos, "Ministério dos Portos e Aeroportos faz balanço das principais entregas e define metas," 2024.
- [149] J. S. D. ABREU, "ANÁLISE DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS PARA A DESCARBONIZAÇÃO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DA INDÚSTRIA NAVAL," 2025.
- [150] D. -. G. f. Communication, "Commission Assessment of the Final Updated National Energy and Climate Plan of Greece," 2025.
- [151] D. F. A. v. d. Kroft e J. F. J. Pruy, "A Study into the Availability, Costs and GHG Reduction in Drop-In Biofuels for Shipping Under Different Regimes between 2020 and 2050," 2021.
- [152] IMO, "The IMO Net-Zero Framework," 2025b. [Online]. Available: https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/faqs-the-imo-net-zero-framework.aspx?utm_source. [Acesso em 03 fev 2026].

[153] IMO, “2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships,” 2023a. [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/2023-imo-strategy-on-reduction-of-ghg-emissions-from-ships.aspx>. [Acesso em 31 jan 2026].

[154] Porto de Açu, “ SubGT 05 - Combustível Aquaviário Sustentável,” 2025. [Online]. Available: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/gt-rcnpe-10-2024/subgrupos/subgt05/apresentacao-mme-gt5-combustivel-maritimo_160525_vfinal.pdf. [Acesso em 20 jan 2026].

[155] IBP, “ SubGT 05 - Combustível Aquaviário Sustentável,” 2025a. [Online]. Available: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/gt-rcnpe-10-2024/subgrupos/subgt05/2024_04_04___apresentacao_ibp_comb_maritimos_descarbonizacao___jorge_carmelo.pdf. [Acesso em 20 jan 2026].