

CEBRI

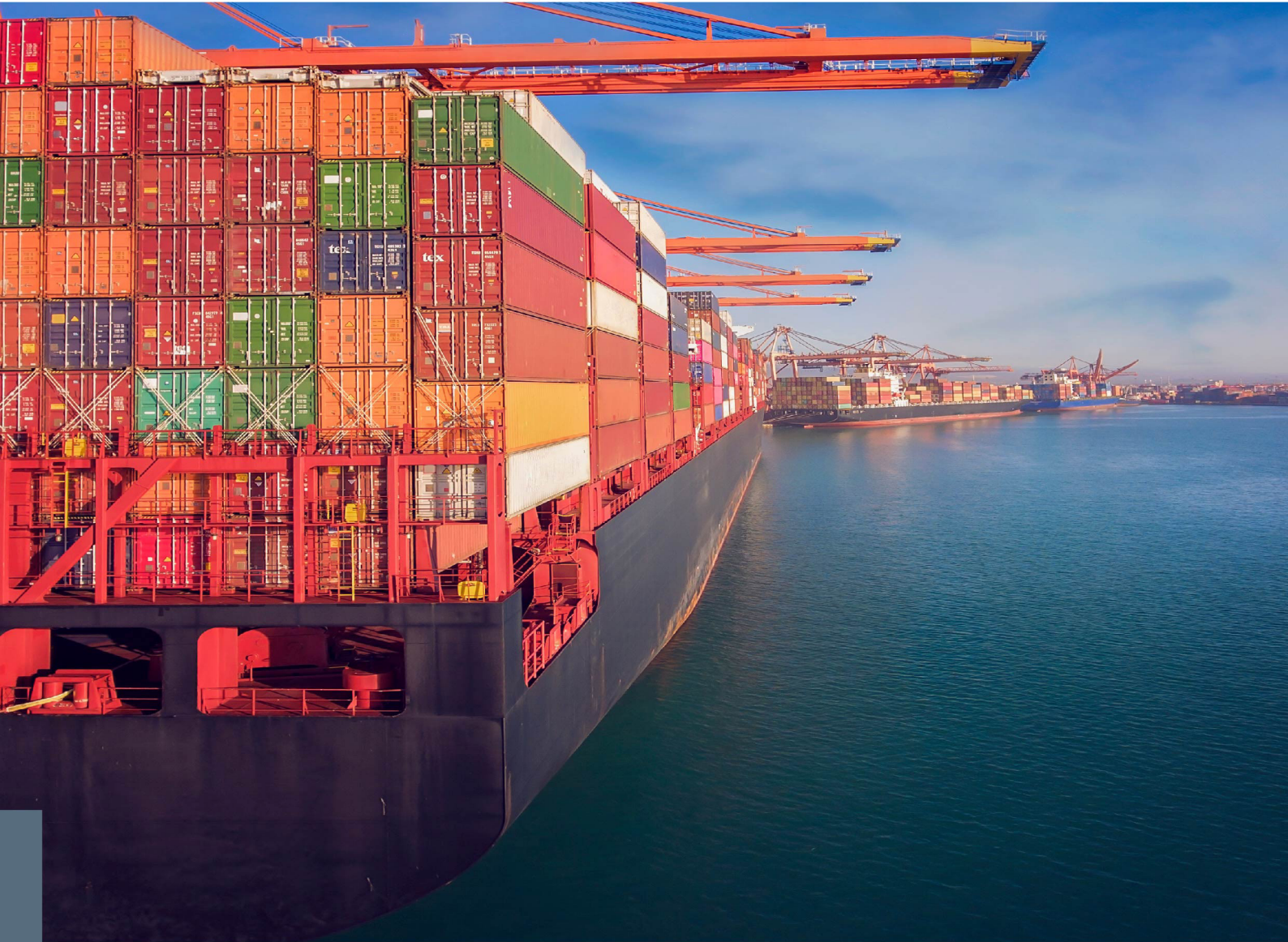
Rethink Tank

Parceria:



Consulado Geral da Noruega

Rio de Janeiro



Alternativas de descarbonização para o setor de transporte marítimo no Brasil: 2024



Rethink Tank

www.cebri.org

#2 Think Tank na América do Sul e Central

*University of Pennsylvania's Think Tanks
and Civil Societies Program 2020 Global Go
To Think Tank Index Report*

PENSAR
DIALOGAR
DISSEMINAR
INFLUENCIAR

Independente, apartidário e multidisciplinar, o Centro Brasileiro de Relações Internacionais é pautado pela excelência, ética e transparência na formulação e disseminação de conteúdo de alta qualidade sobre o cenário internacional e o papel do Brasil. Engajando os setores público e privado, a academia e a sociedade civil em um debate plural, o CEBRI influencia a construção da agenda internacional do país e subsidia a formulação de políticas públicas, gerando ações de impacto e visão prospectiva.

Ao longo de vinte e dois anos de história, já realizou mais de 500 eventos, produziu mais de 200 publicações e atua com uma rede internacional de mais de 100 entidades de alto nível em todos os continentes. A instituição se destaca por seu acervo intelectual, pela capacidade de congregiar múltiplas visões de renomados especialistas e pela envergadura de seu Conselho Curador.

Conectado à agenda internacional, o CEBRI identifica e analisa as mais relevantes questões internacionais, promovendo o engajamento entre a produção de conhecimento e a ação política. Atua como a contraparte de instituições estratégicas globais, como o Council on Foreign Relations, nos EUA, a Chatham House, no Reino Unido, além de diversos outros Conselhos de Relações Internacionais no cenário global.

O reconhecimento de sua importância internacional é atestado ainda pela pesquisa Global Go to Think Tanks, conduzida pela Universidade da Pensilvânia, segundo a qual é considerado um dos think tanks mais relevantes do mundo.

CEBRI

Rethink Tank

NÚCLEO ENERGIA

O Núcleo trata do futuro da energia, das tendências energéticas globais e busca soluções para a criação de um ambiente de investimentos competitivo e atrativo para o Brasil.



Décio Oddone

Diretor Presidente da Brava Energia



Ivan Sandrea

Conselheiro Consultivo Internacional



Rafaela Guedes

Senior Fellow



Gregório Cruz Araújo Maciel

Pesquisador Sênior



Guilherme Dantas

Pesquisador Sênior

FICHA TÉCNICA

Autores

Rafaela Guedes

Guilherme Dantas

Huang Ken Wei



Consulado Geral da Noruega

Rio de Janeiro

O PRESENTE RELATÓRIO É FRUTO DE UMA
COLABORAÇÃO ENTRE O CEBRI E O CONSULADO
GERAL DA NORUEGA NO RIO DE JANEIRO

ÍNDICE

Sumário Executivo	06
Introdução	08
Caracterização do segmento marítimo no Brasil	10
Opções de descarbonização do setor marítimo	16
Panorama atual do setor brasileiro para a descarbonização	35
Ações para descarbonização do setor marítimo norueguês	37
Oportunidades de colaboração entre o Brasil e Noruega	38

SUMÁRIO EXECUTIVO

Em um contexto de necessidade de mitigação da emissão de gases do efeito estufa, o setor marítimo encontra-se diante ao desafio de atender a uma demanda crescente por energia em função do aumento da demanda de movimentação de cargas e pessoas e, ao mesmo tempo, reduzir suas emissões. O cerne da questão é como endereçar este desafio em bases viáveis técnica e economicamente eficientes.

O presente relatório traz uma visão atualizada do relatório “Alternativas de descarbonização para o setor de transporte marítimo no Brasil” publicado em 2023 e tem como objetivo analisar as possíveis ações para descarbonização do setor marítimo brasileiro. O documento aborda a situação do modal marítimo brasileiro, as opções para redução de emissões bem como a identificação de oportunidades de parcerias entre os setores marítimos brasileiro e norueguês por meio de uma análise comparativa das ações em prol da descarbonização.

A principal atualização vista é no âmbito regulatório, com novas metas de descarbonização por parte da Organização Marítima Internacional (IMO), que passou a ter como meta de longo prazo a neutralidade das emissões dos combustíveis considerando o ciclo de vida completo em 2050. Além disso, destaca-se a demanda por ao menos 5% de combustíveis com emissão nula ou reduzida na demanda energética global do setor em 2030. Esse objetivo demanda ações mais urgentes, tendo em vista que o abastecimento energético da frota marítima atualmente depende quase que integralmente de combustíveis fósseis.

Em termos de movimentação brasileira, cerca de 1,3 bilhão de toneladas de cargas passaram por portos e terminais brasileiros no ano de 2023, um aumento de 7% em relação ao ano anterior. Tal crescimento da movimentação, no entanto, contrasta com uma ligeira diminuição da demanda energética da navegação brasileira nos anos recentes devido a medidas de otimização energética nas embarcações.

No que tange à maturidade dos combustíveis alternativos, etanol, amônia, HVO e hidrogênio são os que apresentaram atualizações que os colocam em um crescimento do estágio tecnológico, como o uso bem-sucedido em motores de ignição e a demanda de embarcações com motores cuja queima seja compatível com tais combustíveis. Além disso, de maneira geral, o uso de biocombustíveis foi facilitado por aspectos regulatórios, fazendo com que seja possível a

utilização de até 30% de biocombustíveis na mistura do combustível marítimo. Para o caso do Brasil, a utilização de biodiesel na mistura do combustível marítimo foi validada e aprovada por autoridades brasileiras a ser comercializada em portos e terminais nacionais. Em contraste a isso, ainda há incertezas quanto à quantificação das emissões de ciclo de vida de combustíveis oriundos de biomassa relacionadas ao uso da terra que estão sendo debatidas no âmbito da IMO¹.

Visando a meta de combustíveis sustentáveis em 2030, o estabelecimento de corredores verdes, tema debatido na Conferência das Nações Unidas, tem atraído maior interesse da comunidade marítima. Neste trabalho, é feita uma apresentação dos principais corredores verdes que estão em fase de desenvolvimento, além da análise dos atores envolvidos e vetores energéticos considerados, com ênfase nos corredores que possuem portos da rota localizados na América do Sul.

No Brasil, o projeto de lei “Combustíveis do Futuro”, sancionado em 2024, impulsiona o uso de biocombustíveis, hidrogênio e tecnologias de captura de carbono. O uso de biodiesel em embarcações se tornou possível, e a adição de 5% de óleo vegetal hidrotratado (HVO) na mistura com o diesel passou a ser comercializado. Do lado da infraestrutura, alguns portos brasileiros têm feito estudos e captado investimentos para modificar a infraestrutura para viabilizar abastecimento de combustíveis alternativos, como os portos de Pecém, Suape e Açu².

Na Noruega, as medidas tomadas posicionam o país como líder no uso de combustíveis alternativos. Metade dos navios aptos para uso de combustíveis de baixa emissão no mundo são noruegueses. O país tem portos engajados no desenvolvimento de corredores verdes, terminais de abastecimento de amônia e embarcações tentando o uso de hidrogênio em pilhas a combustível, além de investir em tecnologias de captura de carbono. Empresas norueguesas têm investido em tecnologias sustentáveis, como a conversão de navios para amônia e uso de hidrogênio verde.

A colaboração entre Brasil e Noruega pode ser útil para expandir a produção e uso de , biocombustíveis e hidrogênio, além da eletrificação do transporte fluvial brasileiro de curta e média distância. Parcerias entre empresas dos dois países para tecnologias de eficiência energética, como a otimização de consumo de embarcações, já mostram resultados. O Brasil pode explorar corredores verdes e rotas para a Europa, que corresponde a 17% do destino das exportações brasileiras e 26% das importações³, com isso, contribuindo para o cumprimento das metas climáticas globais até 2030.

¹As discussões nas reuniões da IMO sobre as emissões relacionadas à mudanças indiretas de uso da terra no cultivo da biomassa, que foram citadas no guia de análise de ciclo de vida da organização [71], têm tido atuação de entidades como a marinha [20] e EMBRAPA [135].

²Os portos se destacam, por exemplo, pela iniciativa de projetos para a utilização de hidrogênio como carga e combustível e a participação ativa em atividades em prol do estímulo da descarbonização [11][115-117].

³Números de exportação e importação referentes ao ano de 2023, considerando o valor monetário dos produtos, conforme MDIC [134].

1. INTRODUÇÃO

O transporte marítimo apresenta um papel de relevância dentro da esfera econômica mundial, representando cerca de 90% das transações comerciais globais em termos de volume [1,2]. A atividade do transporte marítimo, fundamental para a economia global, mantém a tendência de crescimento [3]. A movimentação de cargas via modal marítimo tem crescido não apenas em volume, mas também em termos financeiros. Entre 1985 e 2023, o volume total de cargas transportadas em navios triplicou, ao passo que o valor das cargas aumentou em mais de 10 vezes, com o fluxo de cargas via mares chegando a representar, em valor, 60% do PIB mundial em 2022, frente a valores inferiores a 40% em 1985 [4].

Esse crescimento do fluxo de cargas via mares e oceanos se justifica por valores monetários: enquanto o custo direto estimado para transportar uma tonelada de carga para uma distância de 1000 quilômetros é de 4 dólares para o modal marítimo [5], esse custo é de aproximadamente 80 dólares para o modal ferroviário, 300 dólares para o modal rodoviário e 2000 dólares para o modal aéreo⁴ [4]. Conforme UNCTAD [3] mostra, as trocas internacionais via modal marítimo cresceram em 2,4% em comparação com o ano de 2022, cuja movimentação foi de aproximadamente 12 milhões de toneladas transportadas.

Em relação ao serviço de transporte, mensurado em toneladas-milhas, houve um crescimento de 4,2% em relação ao ano anterior, chegando a aproximadamente 63 bilhões de toneladas-milhas. Esse crescimento maior em comparação ao volume transportado é justificado por mudanças nas movimentações devido à Guerra na Ucrânia, ao nível reduzido de água no canal do Panamá e às tensões no Mar Vermelho.

Já no que tange ao transporte de passageiros, por conta da menor demanda energética e de movimentação se comparada ao transporte de cargas [3,6], poucos dados estão disponíveis. Apesar disso, é importante destacar que o transporte de passageiros foi responsável, em 2018, por cerca de 4% de demanda energética do setor marítimo [6]. Para o caso do Brasil, a navegação representava cerca de 0,5% da movimentação de passageiros, medidas em passageiro-quilômetro (pkm)⁵, no ano de 2017 [7].

Dentro desse contexto de crescimento da movimentação e questões geopolíticas, também é necessário reforçar o debate das reduções de emissões do transporte marítimo, que apresenta emissões na ordem de 1,05 bilhões de toneladas de equivalentes de dióxido de carbono (CO_{2eq}) por

⁴Esses valores não levam em conta o custo de oportunidade relacionado à maior agilidade dos demais modais em relação ao modal marítimo, à infraestrutura necessária e às limitações dada a necessidade de vias marítimas para viabilizar o transporte.

⁵Passageiro-quilômetro é uma medida de movimentação de passageiros, calculada a partir do produto quantidade total de passageiros e da distância total percorrida.

ano. É importante destacar que a maior eficiência energética torna o transporte marítimo uma prioridade no transporte de cargas e passageiros tendo em vista o viés de redução de consumo energético, o que fortalece seu papel a curto prazo para impulsionar ações de descarbonização.

Em contraponto, a priorização do modal marítimo impulsiona o crescimento da atividade do setor. Diante do desafio de descarbonizar um setor em expansão tanto em movimentação tanto em tamanho da frota, a IMO revisou em 2023 as metas estabelecidas em 2018 para redução de emissões de gases de efeito estufa. Enquanto o objetivo inicial era de uma redução de 50% nas emissões até 2050, tomando como base os níveis de 2008 [8], as novas metas incluem prazos de curto, médio e longo prazo. Para 2030, o objetivo é diminuir as emissões de GEE em pelo menos 20% em relação a 2008 [9], cujas emissões totalizaram cerca de 1,02 bilhões de toneladas de CO_{2-eq} [10]. Já para 2040, a meta é alcançar uma redução mínima de 70%. Para o ano de 2050, a meta da IMO é de que o setor atinja a neutralidade em emissões de gases de efeito estufa. Tal objetivo inclui a análise de todo o ciclo de vida dos combustíveis utilizados [9].

Além das metas de redução de emissão de gases de efeito estufa, a IMO também trabalha com uma meta para 2030 de que ao menos 5% de demanda energética do transporte marítimo seja suprida por combustíveis de emissão nula ou próxima de zero. Outra questão levantada nas diretrizes das novas metas da IMO é a menção a uma transição justa e inclusiva, visto que países em desenvolvimento, que em 2023 foram responsáveis por enviar e receber cerca de 54 e 53% da carga total do transporte marítimo internacional [3], também terão que atender a demanda da IMO [9].

Os desafios da descarbonização, sejam de natureza econômica, social ou tecnológica, precisam ser considerados. A transição do setor marítimo deve ser planejada como um esforço coletivo, onde todas as nações contribuam proporcionalmente à sua capacidade de recursos, garantindo que nenhuma região seja excluída ou abandonada no processo.

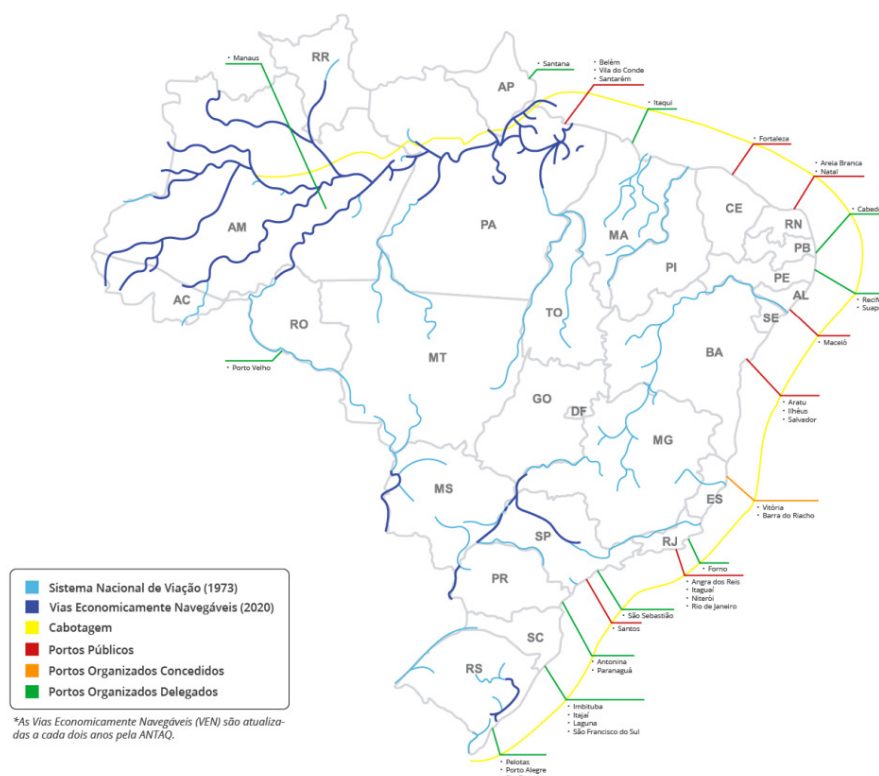
Frente a esse contexto geral, o presente relatório visa atualizar as possíveis rotas e medidas para a descarbonização do setor marítimo brasileiro, bem como possíveis trocas de experiência no setor com a Noruega. Feita essa breve introdução, o segundo capítulo do relatório apresenta uma atualização dos dados do setor de transporte marítimo do Brasil. O terceiro capítulo mostra os avanços nas opções de descarbonização, principalmente os combustíveis alternativos. O quarto capítulo traz o panorama do atual estágio do setor marítimo brasileiro em relação a ações para descarbonização e, o quinto capítulo, o panorama norueguês. Por fim, o sexto capítulo exhibe as conclusões do trabalho e as possíveis sinergias para colaboração entre as nações visando a redução das emissões do setor.

2. CARACTERIZAÇÃO DO SEGMENTO MARÍTIMO NO BRASIL

O modal marítimo do Brasil apresentou um quantitativo de 2312⁶ embarcações em outubro de 2024 [11], um aumento de 31 embarcações em comparação com o levantamento feito em agosto de 2023 [12], que atracam não só nos mais de 380 portos e terminais do território brasileiro [13], bem como em portos internacionais para o caso da navegação de longo curso.

A Figura 1 mostra a disposição das principais rotas nacionais e portos brasileiros.

Figura 1: Principais portos e vias hidroviárias brasileiras.



Fonte: ANTAQ [14].

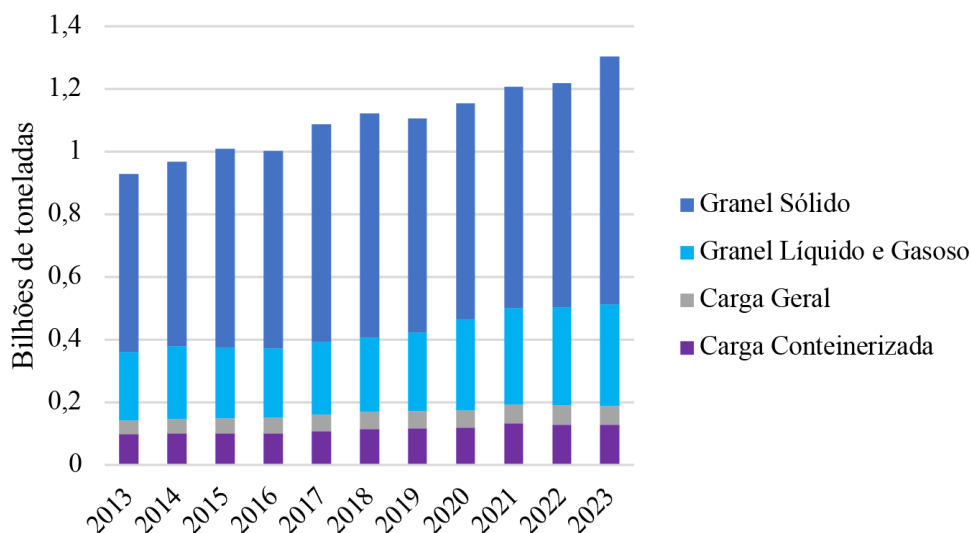
Dados da ANTAQ (Agência Nacional de Transportes Aquaviários) mostram que, no ano de 2023, portos e terminais nacionais tiveram uma movimentação de aproximadamente 1,3 bilhões de toneladas de carga feitas em cerca de 193 mil viagens. Esses quantitativos foram 7% e 3% maior, respectivamente, em relação a movimentação de carga e viagens registradas no ano de 2022⁷. A rota com maior movimentação de cargas em 2023 foi a de Ponta da Madeira, no Maranhão, até o porto de Qingdao, na China, com cerca de 130 milhões de toneladas transportadas, o que equivale

⁶ Embarcações com bandeira brasileira.

⁷ Conforme consta no relatório anterior, a quantidade de viagens do setor marítimo brasileiro em 2021 foi de aproximadamente 400 mil, porém tal índice foi alterado recentemente na base de dados da ANTAQ, e por conseguinte, o valor atualizado de viagens para 2021 é de aproximadamente 194 mil viagens. Os valores de atracações para os anos anteriores também foram atualizados [1].

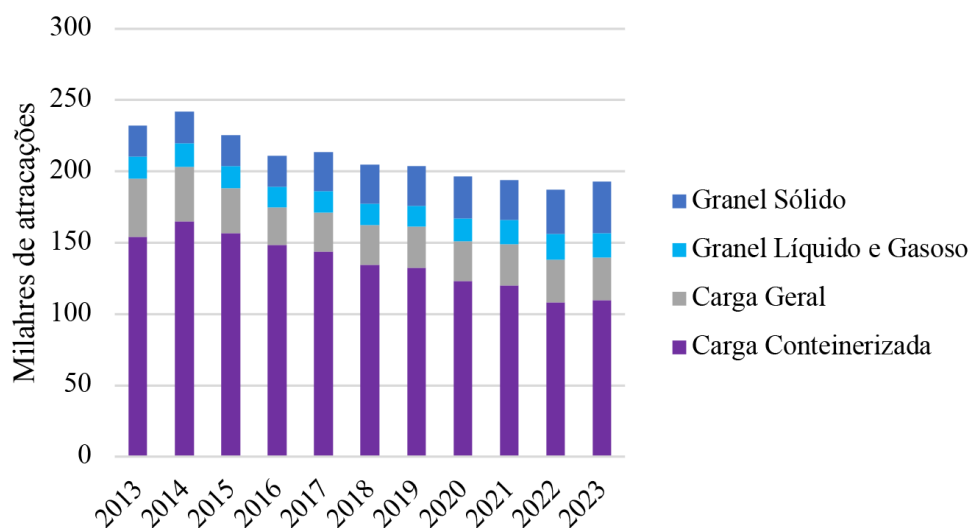
a aproximadamente 10% da movimentação total de cargas para 2023. A Figura 2 mostra a movimentação por tipo de cargas entre 2013 e 2023, enquanto a Figura 3 mostra a quantidade de viagens por tipo de carga entre os anos de 2013 e 2023.

Figura 2: Movimentação total por tipo de carga em portos brasileiros entre os anos de 2013 e 2023.



Fonte: adaptado de ANTAQ [11].

Figura 3: Quantidade de viagens com origem e/ou destino em portos brasileiros por tipo de carga transportada entre os anos de 2013 e 2023.



Fonte: adaptado de ANTAQ [11].

A movimentação de cargas no Brasil em 2022 e 2023 foi dominada pelo granel sólido, que representou 59% e 61% do total movimentado, com volumes de 715 e 790 milhões de toneladas, respectivamente. Minério de ferro, milho e soja foram os principais produtos, somando 74% do total em 2023. Este tipo de carga gerou 31 mil e 36 mil atracações nesses anos, destacando-se a rota entre Porto Velho (RO) e Itacoatiara (AM), responsável por 11% das viagens do segmento em 2023. O granel líquido, por sua vez, movimentou 314 e 325 milhões de toneladas em 2022 e 2023, com

foco na logística de petróleo e derivados, concentrando-se nos terminais de São Sebastião (SP) e Angra dos Reis (RJ). As cargas gerais movimentaram 62 e 60 milhões de toneladas em 2022 e 2023, com pasta de celulose e ferro como principais produtos (74% do total). Rotas destacadas incluem a exportação de ferro entre o Rio de Janeiro (RJ) e os EUA e o transporte de pastas químicas de madeira para a China e o Rio Grande do Sul. A carga containerizada somou 128 milhões de toneladas em ambos os anos, representando apenas 10% do volume total, mas foi responsável por 57% das viagens marítimas em 2023, com o porto de Santos (SP) sendo um hub estratégico.

Quanto à navegação, os volumes em 2023 seguiram a tendência de 2021, com a navegação de longo curso (70%), cabotagem (23%) e interior (6%) dominando o volume total. Em atracações, a longo curso concentrou 56% das viagens, seguida pela navegação de interior (25%) e cabotagem (17%), reafirmando a importância desses modais no cenário nacional. A Tabela 1 resume os dados referentes à movimentação de cargas marítimas no Brasil, destacando os principais tipos, produtos e rotas de maior volume e frequência.

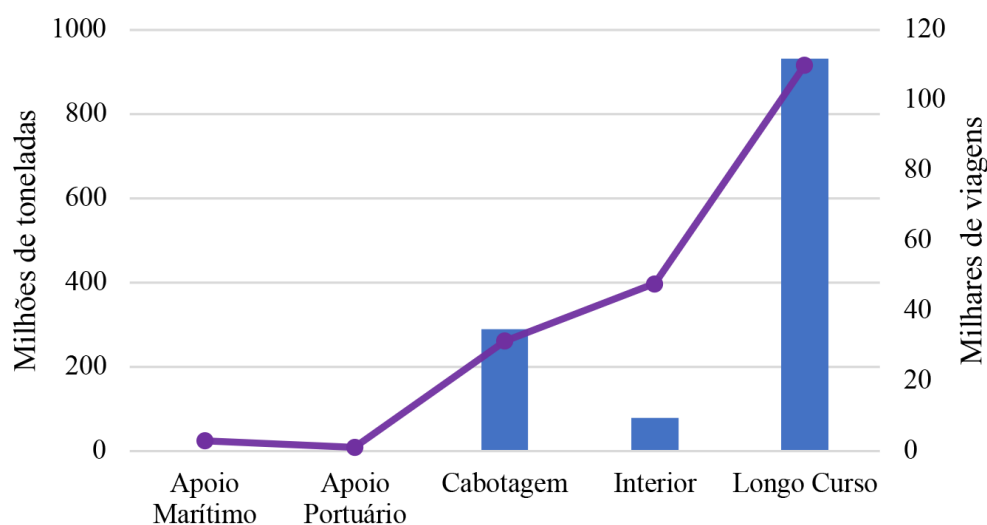
Tabela 1: volume, em milhões de toneladas, por tipo de carga movimentada em portos brasileiros nos anos de 2022 e 23

Tipo de Carga	Volume 2022 (Mt)	Volume 2023 (Mt)	% do Total (2023)	Principais Produtos / Rotas	Viagens 2023
Granel Sólido	715	790	61%	Minério de Ferro (49%), Milho (16%), Soja (9%)	36 mil (19%)
Granel Líquido	314	325	25%	Petróleo e Derivados (20% nas rotas SP e RJ)	17 mil (9%)
Carga Geral	62	60	5%	Pasta de Celulose, Ferro e Aço (74%); Rota RJ - EUA (3,7 Mt)	30 mil (16%)
Containerizada	128	128	10%	Santos - Cingapura; Vitória - Santos	110 mil (57%)
Navegação	-	-	-	Longo Curso (70%), Cabotagem (23%), Interior (6%)	Interior: 25%; LC: 56%

Fonte: adaptado de ANTAQ [11].

A Figura 4 mostra a movimentação de carga e a quantidade de viagens feitas por tipo de navegação com portos brasileiros como origem e/ou destino no ano de 2023.

Figura 4: Movimentação de carga, em bilhões de toneladas, e quantidade de viagens feitas com origem e/ou destino a portos brasileiros em 2023 por tipo de navegação.



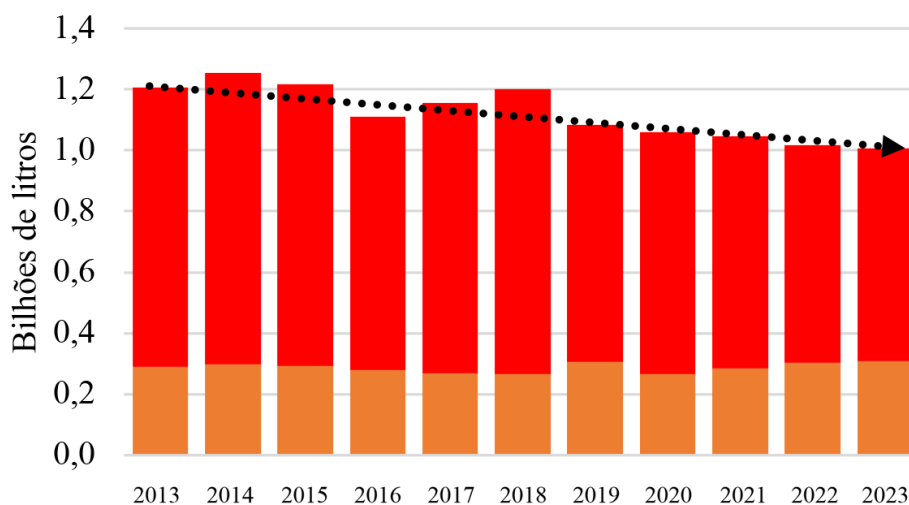
Fonte: adaptado de ANTAQ [11].

Em 2023, a navegação de longo curso destacou-se pelo transporte de minério de ferro, soja, contêineres, petróleo e derivados e milho. As rotas de exportação de minério de ferro para Qingdao, na China, originadas de terminais como Ponta da Madeira (MA) e Tubarão (ES), movimentaram 207 milhões de toneladas, representando 16% do total nacional. O transporte de contêineres liderou em número de viagens, com quase 12 mil viagens envolvendo os portos de Santos (SP) e Paranaguá (PR), mostrando o alto valor agregado dessa carga em relação ao granel, dado que viagens com contêineres transportaram, em média, 14 mil toneladas por viagem, contra 88 mil toneladas no caso de minério de ferro.

Na cabotagem, o petróleo e derivados dominaram, respondendo por 67% das 290 milhões de toneladas transportadas em 2023 e por 4172 atracações, representando 13% do total. A navegação de interior concentrou-se no transporte de soja e milho, com destaque para a rota Miritituba (PA) – Vila do Conde (PA), que movimentou 6 milhões de toneladas de oleaginosas e 4,6 milhões de cereais. A rota Portochuelo (RO) – Hermosa (AM) liderou em número de viagens, com 3950 operações, totalizando 7 milhões de toneladas de carga. Esses dados reforçam a relevância das rotas regionais e intermodais no suporte à logística nacional.

Em relação ao consumo energético do setor de transporte marítimo no Brasil, a Figura 5 mostra a demanda energética, em bilhões de litros de combustível, seja o óleo combustível pesado (em vermelho) ou o óleo diesel marítimo (em laranja), para os anos entre 2013 e 2023.

Figura 5: Consumo energético do transporte marítimo no Brasil entre os anos de 2013 e 2023.

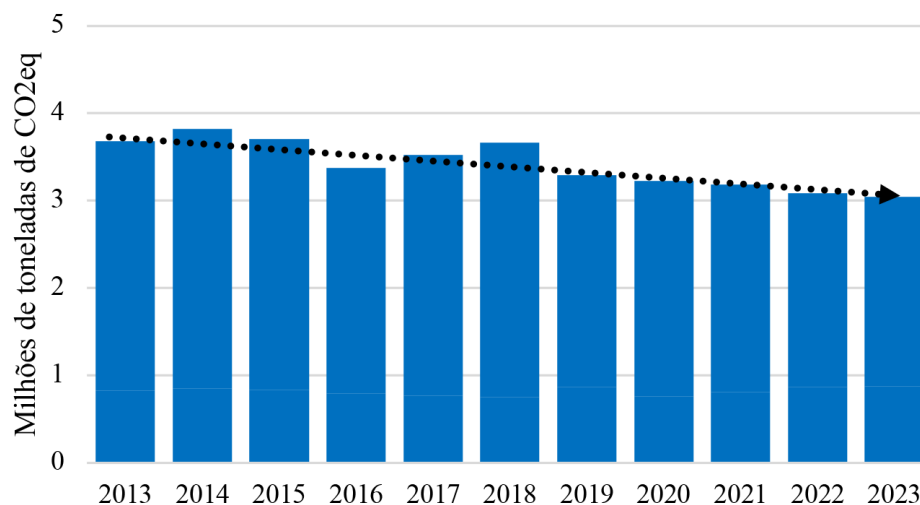


Fonte: EPE, 2024 [15].

Conforme a Figura 5 mostra, a tendência de queda no consumo energético do setor marítimo, conforme constatado no relatório anterior, se mantém. Entre os anos de 2013 e 2023, a média de consumo energético do transporte marítimo foi de 1,1 bilhão de litros, e em 2023 a demanda foi de 1 bilhão de litros de combustível, com queda acumulada desde 2013 de 17% no consumo. Além disso, o diesel marítimo tem crescido sua participação na demanda energética das embarcações brasileiras: em 2018, o combustível representava 22% do suprimento energético total do setor, passando a representar 31% em 2023. Essa redução do consumo pode estar sendo ocasionada por medidas como a redução da velocidade ou a otimização da operação do navio, através de ações como melhorias na forma do casco ou dos sistemas de propulsão. Em 2023, o consumo de óleo combustível pesado foi 697 milhões de litros, ao passo que o consumo de diesel marítimo foi de aproximadamente 309 milhões de litros. Esse consumo de combustíveis representou cerca de 0,4% da demanda total energética consumida pelo país e 1,2% da demanda de todo o setor de transportes nacional em 2023.

O uso final destes combustíveis gerou uma emissão de aproximadamente 3 milhões de toneladas CO₂eq, dos quais 2,2 foram provenientes do uso de óleo combustível pesado e 0,9 do uso de diesel marítimo. A Figura 6 mostra a estimativa de emissões de gases de efeito estufa para o uso final dos combustíveis marítimos no Brasil para os anos entre 2013 e 2023, com os fatores de emissão dos combustíveis baseados em Comer e Osipova [16].

Figura 6: Estimativa de emissões de gases de efeito estufa, em CO2eq, do uso final dos combustíveis para a atividade de embarcações brasileiras entre os anos de 2013 e 2023.



Fonte: elaboração própria.

A redução de emissão tendo como escopo o uso final dos combustíveis para o setor marítimo pode ser vista na Figura 6: se comparada a estimativa de emissões entre os anos de 2023 e 2013, é constatada uma redução de cerca de 17%. Caso comparássemos com o ano de 2008, ano base para as metas de curto e médio prazo da IMO, cuja demanda energética foi de 1,3 milhões de litros ou 60,8 petajoules (PJ) [17], a redução de emissão no ano de 2023 é de 26%. É importante ressaltar que essa redução de emissões é unicamente calcada no menor consumo de combustíveis marítimos.



3. OPÇÕES DE DESCARBONIZAÇÃO DO SETOR MARÍTIMO

Esse capítulo é dividido em três partes. A primeira trata de ações possíveis para cada conjunto de atores do setor marítimo em prol da descarbonização. A segunda parte é focada na produção de combustíveis alternativos. Já a terceira parte avalia as opções de combustíveis alternativos em relação ao seu uso em navios, potencial de redução de emissões, maturidade tecnológica e viabilidade de inserção na frota, além da discussão sobre corredores verdes, ressaltando as atualizações recentes em prol do uso destes combustíveis.



3.1. AÇÕES PARA A DESCARBONIZAÇÃO DO SETOR MARÍTIMO

Quando se aborda a questão da descarbonização do setor de transportes, as diferentes perspectivas devem ser consideradas para que uma solução comum seja alcançada. Dessa forma, duas visões gerais que são opostas devem ser consideradas para a indústria naval: a perspectiva dos reguladores e de órgãos governamentais, que têm o seu foco em ações para que as metas de descarbonização estabelecidas sejam atingidas e a ótica dos armadores e operadores marítimos, que devem procurar maneiras para cumprir as decisões tomadas pelos órgãos governamentais através de ações a curto prazo e que provavelmente terão reflexos a longo prazo nos negócios dessas empresas [18].

Os atores que estão ligados ao setor naval são divididos em 4 categorias principais: entidades governamentais e reguladoras, armadores e operadores, instituições de pesquisa e indústria naval e de energia. Cada um desses grupos de atores tem potenciais ações a serem tomadas para alcançar a redução da emissão de poluentes. A mostra um esquema com as principais ações idealizadas por agente.

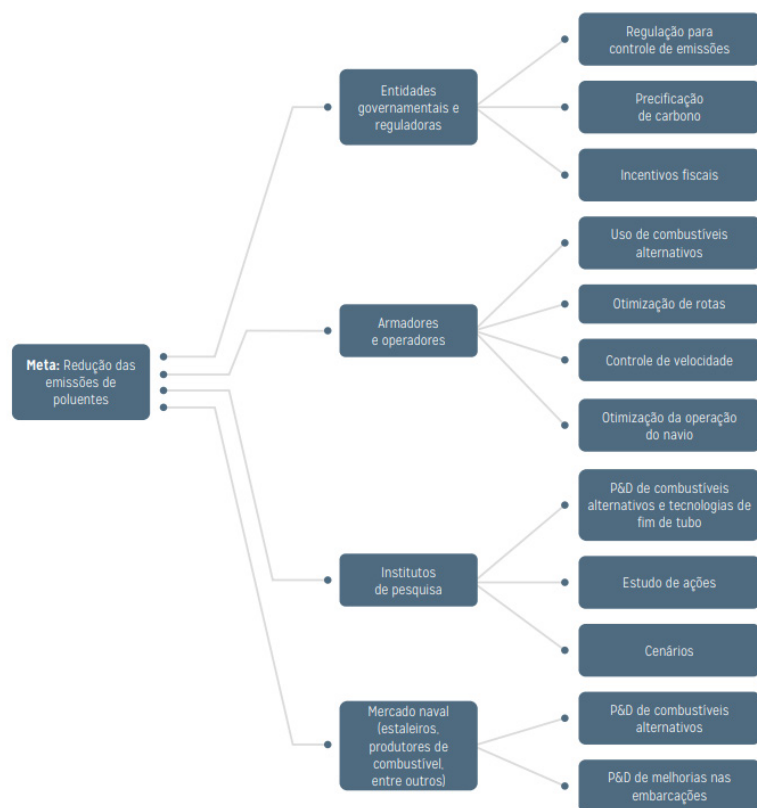


Figura 7: Medidas potenciais que cada conjunto de atores pode tomar para a redução de emissões de poluentes no setor naval.

Fonte: elaboração própria.

As medidas são apresentadas conforme o grupo de agentes já descrito na Figura 7, que serão descritos e exemplificados.

3.1.1. ENTIDADES GOVERNAMENTAIS E REGULADORAS

Neste grupo estão os governos das nações, os membros do governo, ministérios e agências ligadas ao transporte, energia e meio ambiente, além de organizações como as Nações Unidas representadas pela IMO. As políticas e regulações impostas por esses agentes são importantes para facilitar a redução de gases poluentes [19].

3.1.1.1. REGULAÇÃO PARA CONTROLE DE EMISSÕES

O controle de emissões é uma ferramenta que já vem sendo usada em algumas regiões do mundo: além das metas de descarbonização, a IMO estabeleceu as zonas de controle de emissão (*Emission Control Areas, sigla ECA*) de dióxido de enxofre no Mar Báltico, do Norte, na América do Norte e no mar Caribenho dos Estados Unidos [18]. As metas e regulações de controle de emissões são importantes para que os demais atores do setor marítimo sejam pressionados a diminuir a emissão e incentivados a investir em novas tecnologias. Ademais, a fiscalização da poluição no setor naval também tende a ser intensificada pelos países para que as metas e regulações sejam respeitadas.

3.1.1.2. PRECIFICAÇÃO DE CARBONO

A ideia de precificar com taxas conforme a emissão de poluentes que um combustível traz é outra forma importante de ser discutida como medidas de órgãos governamentais. Para este caso, os armadores e operadores pagariam uma taxa fixa com base no consumo de combustível e parte desse dinheiro poderia, por exemplo, ser usado para financiar projetos de redução de emissão de gases de efeito estufa [18]. A adoção da precificação foi debatida na reunião do Comitê de Proteção ao Meio Ambiente Marinho (MEPC, do inglês *Marine Environment Protection Committee*) de outubro de 2024 como medida que deve ser definida até 2027 [20].

3.1.1.3. INCENTIVOS FISCAIS

Uma outra forma de estímulo com relação às emissões pode ser feita através de incentivos fiscais e subsídios, que são concedidos pelas entidades governamentais. A política de subsídios pode ser utilizada para recompensar a redução da poluição do ar por parte das embarcações, se opondo a prática de cobranças ou impostos, que são focados em penalidades. Esses incentivos podem ser feitos na forma de concessões ou empréstimos para abater os custos relacionados à redução de emissões de poluentes da indústria naval, que podem ser provenientes do governo ou de autoridades marítimas [21]. Outros mecanismos de subsídio são doações, menores taxas tributárias, sistemas de licitação, compra de créditos de carbono e outros tipos de ajudas financeiras. Um exemplo de incentivo foi o Porto de Hamburgo, que por um período ofereceu descontos com financiamento público de taxas portuárias para navios que atendessem a certos critérios de emissões [22].

3.1.2. ARMADORES E OPERADORES

Os armadores são os proprietários dos navios e podem ou não optar por realizar a operação dos navios. O armador tem a opção de acionar companhias de navegação para realizar a operação dos navios. Dessa forma, o operador do navio nem sempre é o proprietário da embarcação [23].

3.1.2.1. USO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

Para atender às novas metas de descarbonização impostas pela IMO, o uso em larga escala de combustíveis com emissões de gases de efeito estufa zeradas ou próximas de zero surge como uma das alternativas mais promissoras. As alternativas potenciais de combustíveis marítimos alternativos são diversas e identificar qual deverá ser a escolha para a transição energética do setor naval não é uma tarefa trivial.

3.1.2.2. OTIMIZAÇÃO DE ROTA

O uso de tecnologias mais recentes permite fazer a previsão das condições meteorológicas e do mar com alta precisão, de forma que seja possível selecionar as rotas em que haja a maior eficiência energética da embarcação, contornando as rotas nas quais o navio pode não operar de forma tão eficiente, devido às más condições climáticas. A otimização da rota é uma prática que além de reduzir os custos da operadora, também acarreta em uma redução de consumo de combustível e, por conseguinte, menores índices de emissão de poluentes [21].

3.1.2.3. CONTROLE DE VELOCIDADE

A relação entre o consumo de combustível e a velocidade de navegação não é linear, mas sim proporcional ao cubo da velocidade da embarcação. Assim, uma pequena diminuição da velocidade pode levar a uma redução significativa do consumo de combustível [24]. Essa diminuição de velocidade pode ser feita tanto através de ações operacionais quanto tecnológicas. A redução da velocidade por meio da operação é comumente chamada de *slow steaming*, já a segunda é através da redução da potência instalada nas embarcações [18].

3.1.2.4. OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DO NAVIO

Conforme mencionado no Capítulo 1, dentre as otimizações da operação do navio, pode-se destacar a melhoria da forma do casco, dos sistemas de propulsão ou o aprimoramento da eficiência energética da embarcação. A forma do casco impacta diretamente no desempenho do navio, e sua otimização faz com que possa ser reduzido o consumo de combustível e as emissões de CO₂ em até 15% para grandes embarcações. É importante ressaltar que essa otimização só é válida caso o navio opere de acordo com as especificações de projeto, ou seja, dentro de uma faixa de velocidade recomendada [25].

Com a adoção do EEDI e, recentemente, do EEXI, a IMO passou a regular as emissões do setor marítimo a partir da estimativa de emissões de dióxido de carbono por distância e tamanho dos navios, e essa estimativa é calculada com base na potência instalada nos motores das embarcações e na potência esperada na faixa de velocidade ótima de projeto [18]. Dessa forma, o acompanhamento de dados de operação do navio é vital para alcançar a otimização dos padrões operacionais das embarcações, com o potencial de redução do consumo de combustível em até 20% [26,27].

3.1.3. INSTITUTOS DE PESQUISA

As instituições responsáveis pelo fornecimento de estudos e análises para o desenvolvimento de medidas para redução de emissões para a indústria naval são as instituições acadêmicas, as *think tanks*, órgãos governamentais e organizações não governamentais [28]. Estes agentes são responsáveis pelo desenvolvimento de novas tecnologias, ações e visões para o setor marítimo.

3.1.3.1. PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS E DE TECNOLOGIAS DE FIM DE TUBO

Uma ação importante dos institutos de pesquisa é desenvolver estudos de combustíveis marítimos que tenham emissão menor ou nula de gases poluentes. Em diversos estudos [22,29-31], os combustíveis alternativos têm analisadas as suas características, a maturidade tecnológica, a produção, a compatibilidade com a frota e a infraestrutura existente, as emissões para todo o ciclo de vida, entre outros. A possibilidade de se manter os combustíveis atuais e utilizar tecnologias de fim de tubo para mitigação de emissões também são analisadas pela comunidade científica [32,33].

3.1.3.2. ESTUDO DE AÇÕES

Os pesquisadores que analisam o setor marítimo também podem realizar estudos das possíveis ações necessárias para alcançar as metas impostas pela IMO e quem as deve desempenhar. Diversos estudos da comunidade científica [18,19,22,34] apresentam algumas ações que podem ser tomadas para reduzir as emissões e que estão citadas neste trabalho.

3.1.3.3. CENÁRIOS

Os pesquisadores podem utilizar a metodologia de cenários, na qual são avaliadas as variáveis quantitativas e qualitativas, geralmente envolvidas em sistemas complexos e dinâmicos. Essa metodologia não é uma projeção, e sim uma análise para esclarecer visões e valores distintos com relação a determinadas situações. Os cenários exploram diversos “futuros”, fazendo a exposição das visões e valores diferentes, tentando fazer um contraponto com relação

à visão tradicional, incentivando o debate [35]. Alguns estudos [36,37] fazem a construção de diferentes cenários de regiões distintas para o setor marítimo, com os quais é possível analisar as ações que foram tomadas e os reflexos dessas ações, além de estudos comparativos entre modelos integrados nas quais o setor marítimo tem destaque [38]. Instituições governamentais como a IMO [39] e algumas empresas ligadas ao setor naval como a DNV [40] também fazem a metodologia de cenários para o transporte marítimo.

3.1.4. MERCADO NAVAL

Nesse grupo de agentes estão as construtoras navais, as empresas produtoras de combustível marítimo e empresas que interagem com o setor marítimo como classificadoras, empresas de manutenção e fornecedoras de motores e de propulsores.

3.1.4.1. PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

Assim como os institutos de pesquisa, as empresas ligadas ao mercado naval têm papel fundamental para a pesquisa e o desenvolvimento de combustíveis menos emissivos ou com emissão nula de gases poluentes. A produção e desenvolvimento destes combustíveis já é feito por algumas empresas como Neste [41], BP, Repsol, Galp, Total, Cespa, Honeywell BTG-BTL, TechnipFMC, Fortum e Valmet [42], além de outras empresas já estarem com pretensão de começar a produção, como a Petrobras [43].

3.1.4.2. PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE MELHORIAS NA INFRAESTRUTURA

Os fabricantes de motores marítimos também têm feito análises e testes com o objetivo de encontrar um sistema de propulsão ideal para o uso de combustíveis alternativos. Empresas como a Caterpillar, MAN Diesel e Wartsila tem feito testes e adaptações para o uso de biocombustíveis em motores diesel, que são os motores tradicionais em embarcações [44]. Há a opção de mudar a tecnologia de propulsão, utilizando sistemas baseados na propulsão a partir do vento ou de energia solar, além da eletrificação da propulsão com o uso de pilhas a combustível e baterias [18]. O uso de pilhas a combustível também já tem as diretrizes apresentadas pela DNV GL, que é uma sociedade classificadora, com informações sobre o local e o projeto de instalação das pilhas a combustível. Além disso, a DNV também apresenta os procedimentos para o abastecimento seguro de alguns combustíveis alternativos que possuem o ponto de fulgor menor que os tradicionais ou são tóxicos [45].

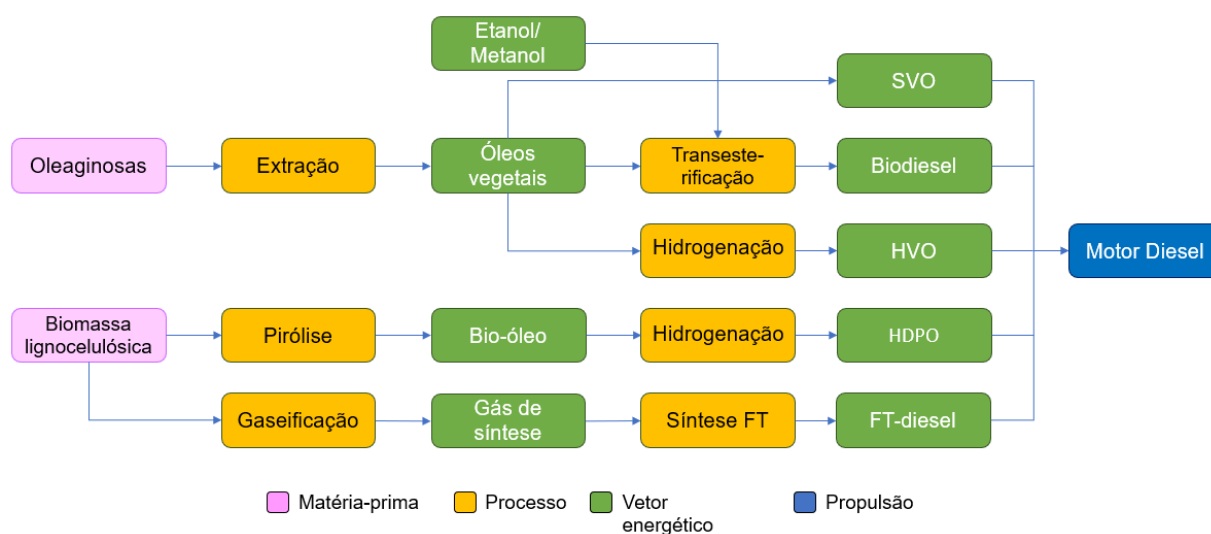


3.2. PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

Sob uma perspectiva estritamente tecnológica, há uma variedade de opções a considerar para a produção de combustíveis alternativos, abrangendo desde a utilização direta de óleos vegetais até a fabricação de combustíveis sintéticos por meio da conversão de hidrogênio e dióxido de carbono (CO₂) reciclado [46]. No entanto, é crucial incorporar também fatores econômicos, ambientais e operacionais na avaliação da viabilidade do uso de alternativas de combustíveis para navegação, dentro do período temporal delineado pelas metas do setor para 2050.

As figuras 8, 9 e 10 mostram as rotas de produção de diversos combustíveis alternativos, que podem ser divididas em três grupos, conforme apresentado no estudo de Carvalho et al [47]. O primeiro grupo abrange combustíveis destilados. Já o segundo grupo é composto por álcoois e gases liquefeitos. Por fim, o terceiro grupo tem o hidrogênio, amônia e os eletrocombustíveis, que são combustíveis sintéticos feitos a partir de hidrogênio.

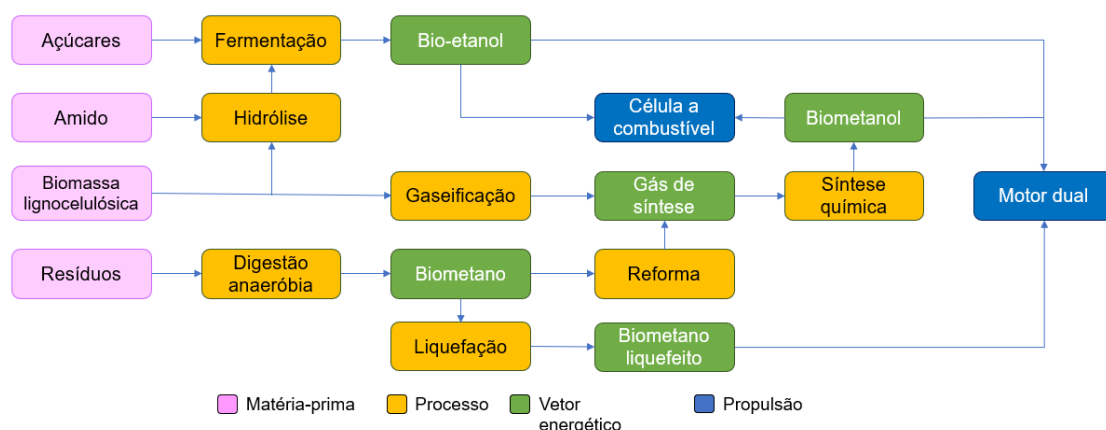
Figura 8: Combustíveis destilados, combustíveis alternativos potencialmente neutros em carbono para o setor marítimo.



Fonte: Carvalho et al [47].

Os biocombustíveis líquidos destilados se enquadram na categoria de combustíveis drop-in⁸ (ou quase drop-in⁹), derivados de óleos vegetais, biomassa lignocelulósica (incluindo resíduos agrícolas e florestais) ou bio-álcoois. Biocombustíveis originados de óleos vegetais englobam os óleos vegetais puros (SVO) e os óleos vegetais hidrotratados (HVO), enquanto aqueles derivados de biomassa lignocelulósica e bio-álcoois incluem o óleo de pirólise hidrotratado (HDPO), o diesel de Fischer-Tropsch (diesel FT) e o diesel à base de álcool (ATD), respectivamente.

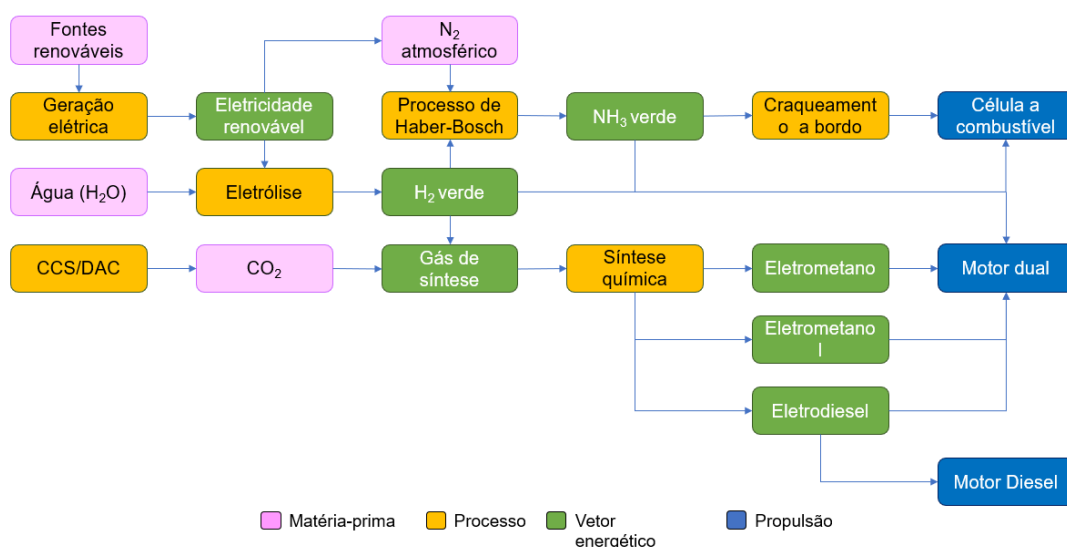
Figura 9: Álcoois e gases liquefeitos, combustíveis alternativos potencialmente neutros em carbono para o setor marítimo.



Fonte: Carvalho et al [47].

O álcool e os gases liquefeitos formam o segundo conjunto de combustíveis, representando opções que não são ideais para substituir diretamente os combustíveis marítimos convencionais, ou seja, não drop-in. No entanto, sua aplicação pode ser atrativa, principalmente devido ao aumento do uso de motores *dual-fuel*, que utilizam um combustível piloto¹⁰ para iniciar a ignição e o combustível principal para completar a combustão, na frota marítima. Combustíveis deste grupo são o biometano liquefeito, bem como o metanol e o etanol derivados de biomassa biometanol e bioetanol, respectivamente).

Figura 10: Hidrogênio, amônia e eletrocombustíveis, combustíveis alternativos potencialmente neutros em carbono para o setor marítimo.



Fonte: Carvalho et al [47].

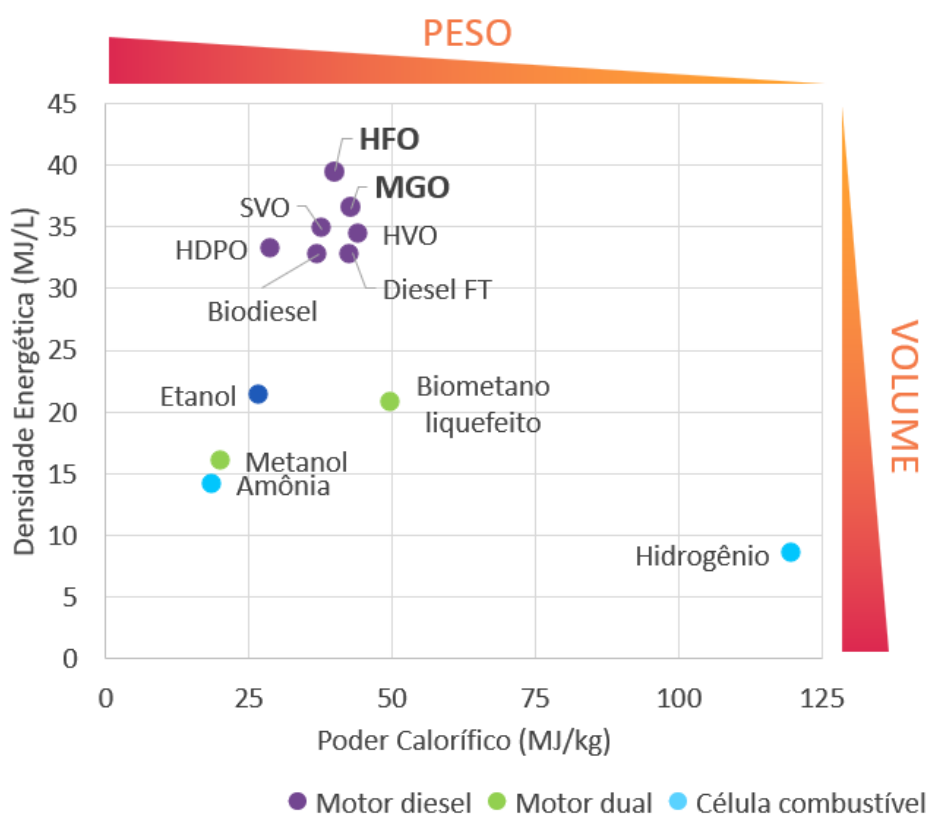
⁸ Combustíveis drop-in são capazes de ser utilizados nos motores de navios e na infraestrutura de abastecimento atual, podendo, assim, substituir diretamente ou ser misturados com combustíveis marítimos tradicionais.
⁹ Os combustíveis classificados como quase drop-in são aqueles que demandam alterações na infraestrutura de alimentação do motor e abastecimento, porém não demandam um tipo de conversor energético diferente do tradicionalmente utilizado na indústria marítima.
¹⁰ O combustível piloto é um combustível com propriedades adequadas para iniciar a ignição em alta pressão, utilizado em casos nos quais o combustível principal é um gás ou um líquido que não apresenta características ótimas de ignição por pressão. Geralmente o combustível a ser utilizado como piloto é o diesel, e tal configuração é utilizada em motores chamados *dual-fuel*, cuja queima é iniciada pelo diesel e mantida pelo combustível principal.

Por fim, o terceiro conjunto compreende combustíveis baseados em hidrogênio, englobando não somente o hidrogênio puro (H₂), mas também a amônia (NH₃) e os combustíveis sintéticos, produzidos a partir de hidrogênio gerado por eletrólise e CO₂ capturado, denominados eletrodiesel, eletrometano e eletrometanol.

3.2.2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

A apresenta uma comparação entre os combustíveis tradicionais (HFO – óleo combustível pesado e MGO – gasóleo marítimo, similar ao diesel marítimo) e alguns dos combustíveis alternativos citados anteriormente em termos de densidade energética e poder calorífico. Quanto menor o poder calorífico, maior o peso. Por outro lado, quanto menor a densidade, mais espaço necessário para o armazenamento.

Figura II: Comparação de densidade energética e poder calorífico entre os combustíveis tradicionais e alternativos.



Fonte: adaptado de DNV GL [46].

O biometano liquefeito surge como a alternativa para reduzir as emissões de óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio e partículas [48], sendo um combustível similar ao gás natural liquefeito (GNL), porém com a rota de produção a partir de biomassa [47]. Em condições de temperatura e pressão atmosférica, o combustível se encontra na fase gasosa e tem uma baixa densidade. Para otimizar o armazenamento, o gás natural deve ser liquefeito a uma temperatura de -162°C e pressão atmosférica, resultando em uma redução do volume necessário para o armazenamento [49].

O bioetanol, também chamado de etanol, é um álcool que é produzido em grande parte a partir de fermentação e destilação de biomassas contendo açúcar ou amido, como milho, cana-de-açúcar e trigo [50]. É um composto altamente inflamável pois o ponto de fulgor é extremamente baixo, densidade energia menor que os combustíveis tradicionais e alto índice de carbono [51].

As características dos biocombustíveis podem variar de acordo com a matéria-prima empregada na produção. Biodiesel, SVO, HVO, HPO e o diesel FT apresentam níveis de densidade energética próximos aos do HFO e MGO, quando comparados a outros combustíveis discutidos, o que sugere um maior potencial para proporcionar maior autonomia ou demandar menos espaço de armazenamento. O SVO é um biocombustível que envolve um processo de produção direta em comparação com outros combustíveis. As etapas de produção incluem a coleta de biomassa, prensagem de sementes em baixa temperatura e filtração para remover impurezas. A qualidade do combustível é grandemente influenciada pela qualidade da matéria-prima e pelas condições durante a produção e processamento [52]. Em comparação com combustíveis marítimos tradicionais, o SVO apresenta uma densidade energética ligeiramente menor, mas um ponto de fulgor, viscosidade e acidez mais elevados. Essas características podem potencialmente resultar em corrosão nas tubulações de alimentação do motor [53]. O biodiesel, frequentemente considerado um dos biocombustíveis mais promissores, é frequentemente apontado como um possível substituto do diesel no setor de transporte rodoviário [34].

O HVO é um combustível composto por cadeias lineares de hidrocarbonetos parafínicos, que passa por etapas adicionais de produção em comparação com o SVO. O HVO se destaca por seu teor extremamente baixo de enxofre e emissões mínimas [54]. Sendo um composto parafínico, o HVO apresenta um alto número de cetano, geralmente variando de 75 a 95 [55]. O óleo de pirólise, também conhecido como bio-óleo ou até mesmo HDPO, é derivado de biomassa, que passa por um processo de alta temperatura na ausência de oxigênio. Dependendo do processo de pirólise, o teor de água no HDPO pode atingir até 30%, o que é suficiente para induzir a separação de fases quando armazenado à temperatura ambiente por seis meses [56]. Por fim, o diesel FT é um combustível drop-in, o que significa que pode ser empregado diretamente nos motores a diesel, sem a necessidade de modificações nos motores ou na infraestrutura de abastecimento. Além disso, o combustível apresenta uma densidade ligeiramente inferior à dos combustíveis convencionais,

Em relação à viscosidade, tanto o SVO quanto o HDPO exibem níveis elevados, exigindo medidas adequadas para reduzir a viscosidade, como o pré-aquecimento. Além disso, esses combustíveis também são notáveis por seus altos níveis de acidez. O biodiesel apresenta uma viscosidade maior do que a do diesel tradicional, embora não tão alta quanto a do SVO e do HDPO, daí a recomendação de pré-aquecimento [57]. O HDPO possui uma viscosidade notavelmente alta e instável, apresentando desafios tanto para seu uso como combustível quanto para seu armazenamento [58]. O baixo ponto de fulgor do biodiesel restringe sua aplicação prática em condições de baixa temperatura do ar [59]. Por outro lado, o HVO

apresenta um ponto de fulgor mais alto do que os combustíveis tradicionais [55]. O diesel FT apresenta uma viscosidade dentro da mesma faixa dos combustíveis fósseis e um número de cetana superior, o que indica que o combustível oferece um desempenho elevado [60].

O nível de acidez do SVO, semelhante ao biodiesel, está ligado à sua matéria-prima específica, assim como é o caso do biodiesel. Embora certos óleos vegetais possam apresentar níveis de acidez mais altos em comparação com o HFO, outros demonstram valores de ácido relativamente baixos, como observado no óleo de canola, que possui um nível de acidez abaixo de 2,5 mg KOH/g [52]. Apesar de passar por tratamento que reduz a acidez em aproximadamente 70%, o HPO mantém um nível de acidez significativamente mais alto quando comparado aos combustíveis marítimos tradicionais [58].

O metanol [61] e amônia [62] são amplamente utilizados como matérias-primas na indústria química. Devido à sua alta toxicidade, é imperativo implementar medidas de segurança para evitar vazamentos e exposição humana a essas substâncias. A amônia foi proposta como um possível transportador sustentável de energia para o hidrogênio devido à sua composição de três átomos de hidrogênio por molécula de amônia (NH₃) [63]. Além disso, o armazenamento de hidrogênio líquido requer temperaturas extremamente baixas, especificamente -253°C [64]. O hidrogênio é reconhecido como um promissor combustível marítimo, com testes em andamento visando avançar sua utilização na indústria de transporte marítimo. No entanto, como relatado pela ABS [65], o hidrogênio atualmente oferece uma saída de energia muito limitada, acompanhada por custos significativos e produção restrita. Além disso, o armazenamento de hidrogênio em embarcações apresenta desafios significativos que a comunidade marítima ainda precisa superar.

A amônia possui um teor de energia 1,7 vezes maior em comparação com o hidrogênio [66], juntamente com um teor de hidrogênio 50% maior em volume [67], resultando em requisitos reduzidos de volume de armazenamento de combustível. O metanol, que é líquido em condições atmosféricas [68], requer pressurização. Assim como o GNL, a amônia também exige temperaturas mais baixas e pressurização para manter seu estado líquido durante o armazenamento. A amônia pode ser armazenada a 25°C sob pressurização de 10 bar, enquanto sob pressão atmosférica, a temperatura de armazenamento necessária é de -33,4°C [66]. Metanol e GNL são ambos combustíveis de baixo ponto de fulgor, tornando-os altamente inflamáveis. O metanol é inflamável e apresenta menor lubrificação em comparação com os combustíveis marítimos convencionais [53]. Apesar de seu alto ponto de fulgor, a amônia apresenta velocidade de chama menor em comparação com os combustíveis convencionais. Além disso, a amônia é caracterizada por sua alta toxicidade [69]. A presença de altas concentrações de amônia gera riscos à saúde e pode ser letal dentro de determinadas faixas de concentração e durações de exposição [62]. Por fim, o etanol é caracterizado pelo baixo número de cetana, que pode gerar combustões com muito atraso na ignição [70], inviabilizando o uso em motores de ignição por compressão.

Biodiesel sendo testado em embarcações na mistura com combustíveis tradicionais e norma estabelecida; Metanol e GNL já utilizados em navios, porém produção sustentável desses combustíveis ainda é incipiente; HVO e Diesel FT, além de ter concorrência do setor aéreo e rodoviário, demandam menos adaptações a estrutura portuária em geral por serem similares ao diesel marítimo; SVO e HDPO demandam pré-aquecimento, bem como o HFO. HDPO demanda tratamento para reduzir acidez e melhorar estabilidade durante o armazenamento.



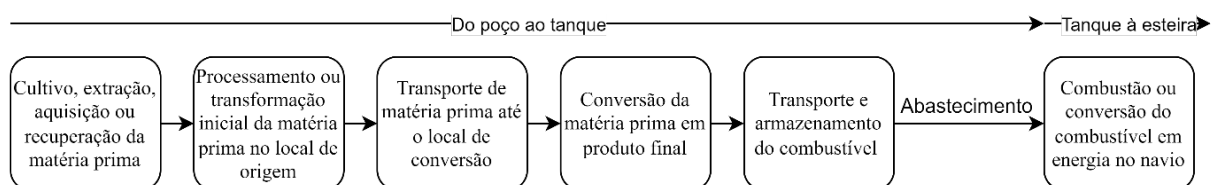
3.3. MATURIDADE E VIABILIDADE DE USO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

Esta seção é composta por uma discussão a respeito das principais opções de combustíveis alternativos para embarcações. Inicialmente, discutindo a maturidade tecnológica e viabilidade de aplicação seguido de uma análise em relação ao potencial de redução de emissões na aplicação dos combustíveis é apresentado.

3.3.1. REDUÇÃO NA EMISSÃO DE POLUENTES

Com a nova meta da IMO para o ano de 2050, a análise de emissão de gases de efeito estufa do setor marítimo tem seu escopo alterado, passando ser o ciclo de vida completo, ou seja, contempla desde a produção do vetor energético até o uso final. Essa análise, que para o setor marítimo adota-se o termo do “poço à esteira”, deve ser feita com a quantificação de todas as fases produtivas, logísticas e do uso do combustível, conforme a Figura 12 apresenta.

Figura 12: Ciclo de vida do combustível marítimo.



Fonte: IMO, 2023 [71].

Em julho de 2023, a IMO lançou o guia de Análise de Ciclo de Vida (ACV) com o Rótulo do Ciclo de Vida do Combustível (FLL, do inglês *Fuel Lifecycle Label*), padronizando informações como tipo, matéria-prima, emissões e sustentabilidade. O FLL avalia desde a produção até o uso, incluindo créditos de carbono e impacto ambiental do ciclo completo. Com cinco partes, aborda produção (“poço ao tanque”), uso (“tanque à esteira”), emissões totais e desempenho sustentável, considerando GEE, recursos naturais e biodiversidade. O objetivo é uniformizar dados e rotas produtivas com respeito às particularidades regionais. [71].

A ACV, cuja metodologia é baseada na ISO 14044:2006, deve utilizar a abordagem atribucional¹¹ e a quantificação das emissões deve empregar o índice de potencial de aquecimento global (sigla GWP, do inglês *Global Warming Potential*)¹², com um horizonte

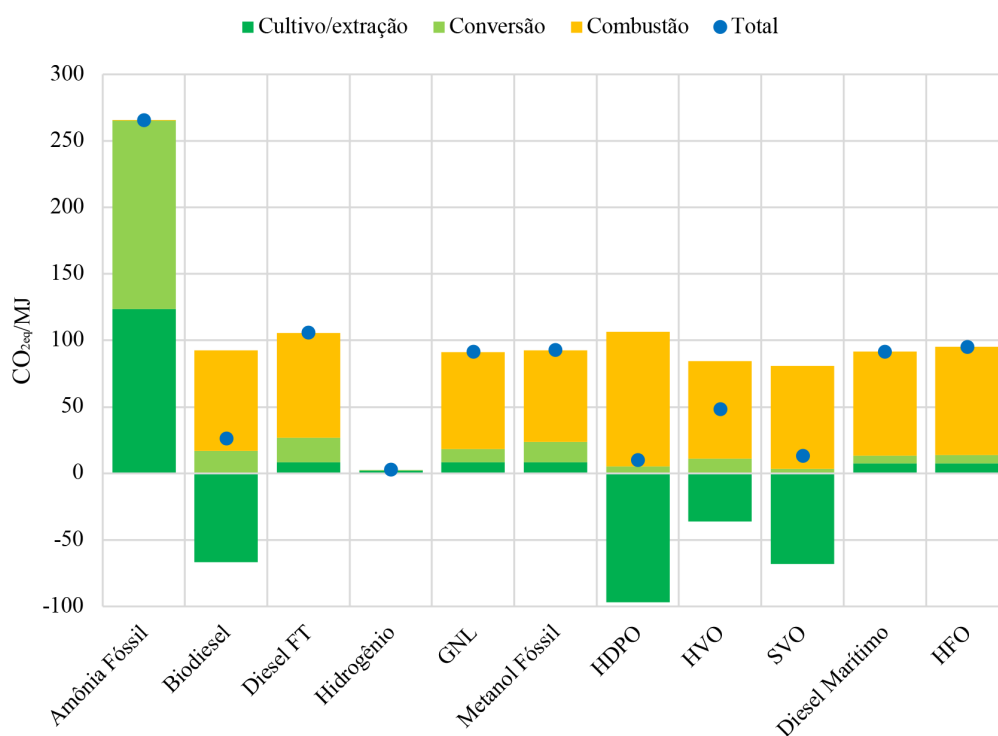
¹¹ A análise de ciclo de vida atribucional contabiliza os impactos ambientais diretos do uso de um determinado produto. Já a análise de ciclo de vida consequential avalia não somente os impactos ambientais diretos do produto, bem como os impactos indiretos do uso do produto, sendo, portanto, uma análise com maior complexidade [136].

¹² O potencial de aquecimento global mede o forçamento radiativo após a emissão de uma massa unitária das principais substâncias causadoras do efeito estufa, acumuladas durante um período escolhido, em relação ao da substância de referência, dióxido de carbono (CO₂). O GWP representa, assim, o efeito combinado dos diferentes tempos em que essas substâncias permanecem na atmosfera e sua eficácia em causar forçamento radiativo [72].

temporal de 100 anos, baseado na quinta edição do relatório de Avaliação do IPCC. Para este índice, o GWP de 100 anos do CO₂, CH₄ e N₂O. 1 grama emitido de CH₄ e 1 grama de N₂O são considerados equivalentes a 28 gramas de CO₂ e 265 gramas de CO₂, respectivamente. A unidade de medida para o GWP é em gramas de CO₂ equivalente (CO_{2-eq}) [72]. A abordagem atribucional considera toda a cadeia produtiva e o uso do combustível, mas pode ser expandida para incluir mudanças indiretas de uso do solo (ILUC, do inglês *Indirect Land Use Change*), analisadas através de uma perspectiva de risco de aspectos de sustentabilidade, com a IMO citando como exemplo a produção de biocombustíveis [71].

Conforme citado no relatório anterior, as emissões do ciclo de vida de um combustível dependem do processo produtivo [12]. Um exemplo disso pode ser visto na que mostra o ACV de diversos combustíveis considerando a produção nos Estados Unidos [73], na qual podem ser vistas as emissões durante o cultivo e/ou extração da matéria-prima, conversão e combustão, além da emissão líquida total.

Figura 13: Emissões para o ciclo de vida completo de alguns combustíveis marítimos.



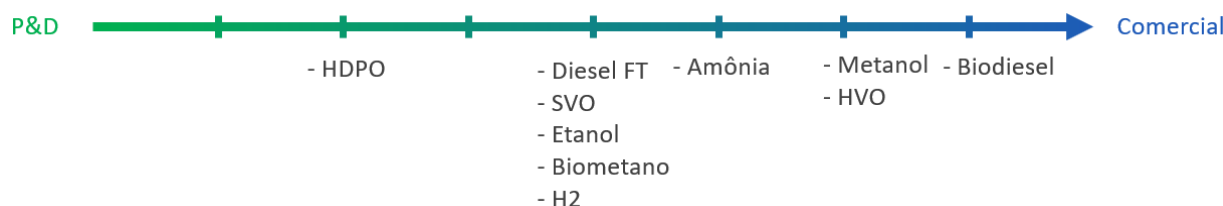
Fonte: Zincir e Arslanoglu [73].

Conforme a apresenta, alguns dos combustíveis alternativos tem sua produção considerada a partir de origem fóssil: amônia, Diesel FT e metanol. As emissões de hidrogênio são baseadas em uma rota de produção de eletrólise a partir de eletricidade gerada de forma renovável. No trabalho de Zincir e Arslanoglu [73], estes combustíveis tem sua produção baseada em gás natural, e por isso apresentam fatores de emissão do ciclo de vida completo similares aos dos combustíveis tradicionais, e para o caso da amônia fóssil, esse índice chega a ser 2,8 vezes maior que o do HFO. O exemplo reforça que para a certificação dos combustíveis, é fundamental que o processo produtivo seja analisado, bem como a região da produção e a matéria-prima empregada.

3.3.2. MATURIDADE TECNOLÓGICA

De maneira geral, a aplicabilidade dos combustíveis considerando o estágio da produção e a infraestrutura de portos e navios apresenta algumas mudanças em relação ao que foi apresentado no relatório anterior. A Figura 14 mostra estágio de maturidade tecnológica dos combustíveis para o caso do setor marítimo brasileiro.

Figura 14: Atual estágio de maturidade tecnológica dos combustíveis alternativos para o caso brasileiro.



Fonte: elaboração própria.

3.3.2.1. BIODIESEL

Em relação ao biodiesel, a IMO adotou uma diretriz na qual foram removidas as barreiras regulatórias para proporções de até 30%, em volume, de combustíveis oriundos de biomassa na mistura de combustível marítimo [74,75]. Tal diretriz substituiu a ISO 8217:2017 – que permitia a utilização de até 7% v/v de biocombustível em tal mistura [76] –, fazendo com que uma proporção maior deste tipo de combustível possa ser usada em embarcações. O novo limite de proporção de biocombustíveis fica de acordo com testes feitos por fabricantes de motores marítimos, que já haviam testado e aprovado misturas de combustíveis com 30% de biocombustíveis [59]. Assim, no aspecto regulatório, há um avanço por parte dos biocombustíveis. No caso do biodiesel, os testes feitos pela Petrobras com uso de até 24% do biocombustível na mistura foram bem-sucedidos.

Desta forma, em julho de 2024, a empresa foi autorizada pela ANP a comercializar um combustível marítimo cuja mistura é composta de 24% de biodiesel de segunda geração e o restante de óleo combustível pesado com baixo teor de enxofre [77]. Além disso, a ANP também autorizou o uso do biodiesel como combustível único – chamado de B100 – para embarcações da empresa Hermasa, no trecho de Porto Velho (RO) e Itacoatiara (AM) a partir de abril de 2024 [78]. Portanto, no âmbito regulatório, houve avanços em relação ao uso de biocombustíveis em geral, e para o caso brasileiro, para o biodiesel. Pelo fato de o biodiesel já ter sido considerado em estágio de uso comercial no relatório anterior, seu nível de maturidade não se alterou.

3.3.2.2. METANOL

Em relação ao metanol, em outubro de 2024, 31 navios da frota mundial já utilizavam o composto como combustível, com 130 terminais já compatíveis para o abastecimento dessas embarcações [79]. Este combustível alternativo tem atraído grande interesse dos armadores, e em 2024 cerca de 10% das encomendas de navios em termos de tonelagem são de embarcações compatíveis para o uso de metanol [27]. Considerando a frota existente e navios encomendados,

a quantidade de navios movidos a metanol é de cerca de 300 navios, dos quais 170 são porta contêineres, 50 navios químicos e 10 graneleiros [4]. Em termos de maturidade tecnológica, apesar do crescimento da frota com metanol e maior interesse, o nível de maturidade se mantém em relação a 2023, por conta da manutenção da necessidade de maior desenvolvimento da produção verde do combustível.

3.3.2.3. HVO

O HVO é um potencial substituto do diesel marítimo devido à sua compatibilidade com motores convencionais [80]. Testes realizados em caminhões e carros em países como Alemanha, Canadá, EUA, Finlândia e Suécia demonstraram sua eficiência, inclusive em condições extremas, como em Alberta, Canadá, com temperaturas de -44°C [41]. Contudo, até 2023, não havia registros de testes em navios [31]. A adoção do combustível no setor marítimo enfrenta desafios, como produção limitada, custos elevados e concorrência com os setores rodoviário e aéreo [81]. Apesar disso, em fevereiro de 2024, a Petrobras passou a comercializar uma mistura de diesel fóssil com 5% de HVO. Dessa forma, tendo em vista a produção e comercialização do combustível na mistura e sua alta compatibilidade com a infraestrutura marítima, considera-se que o HVO alterou seu nível de maturidade tecnológica para um patamar alto.

3.3.2.4. AMÔNIA

A amônia atualmente se beneficia de uma rede estabelecida de cadeia de suprimentos principalmente voltada para seu uso na indústria química [66], com transporte eficiente por navios em todo o mundo. Uso de amônia em motores de ignição apresentou avanços, com o estabelecimento, por exemplo, de motores de 4 tempos, utilizado em embarcações de pequeno porte, pela empresa Wärtsilä [82]. O uso do combustível em amônia em motores de 2 tempos também foi anunciado pelas principais fabricantes de motores de navios e até agosto de 2024, 20 navios cujo vetor energético é a amônia estão sendo construídos, dentre os quais 10 são graneleiros, 9 navios de gases liquefeitos, 2 petroleiros e 1 porta contêiner [4]. Sendo assim, em comparação a 2023, há um crescimento na maturidade tecnológica do combustível creditada ao estabelecimento de motores compatíveis.

3.3.2.5. DIESEL FT

Apesar de o Diesel FT ser idêntico à opção fóssil em termos físico-químicos e de usabilidade e o processo de Fischer-Tropsch em si já são maduros, a integração em si dos processos envolvidos na produção de um combustível por essa rota e a demonstração operacional ainda estão em estágio de desenvolvimento [83]. Além disso, o processo de Fischer-Tropsch ainda não tem registros de larga escala operacional, bem como diversos projetos de demonstração na escala industrial foram cancelados na Europa [84]. Sendo assim, o Diesel FT foi classificado com desempenho mediano no critério de maturidade tecnológica.

3.3.2.6. SVO (ÓLEO VEGETAL DIRETO, DO INGLÊS *STRAIGHT VEGETABLE OIL*)

No âmbito do aproveitamento direto de óleos vegetais, que compartilha com o HFO algumas semelhanças de uso, é improvável que uma mistura desses dois tipos de combustíveis seja compatível. Portanto, a solução mais prática e viável seria a substituição completa do HFO pelo SVO. O uso do SVO em aplicações marítimas ainda está em pesquisa, tanto como substituto direto quanto como uma mistura com combustíveis convencionais [53]. Observou-se que, se a mistura contiver no máximo 20% v/v de SVO com diesel, não são necessárias mudanças nos sistemas de alimentação de combustível dos motores [85]. Além disso, constatou-se que o pré-aquecimento do SVO a temperaturas entre 55 e 85°C permite um aumento na porcentagem de SVO na mistura para 30% a 60% v/v sem exigir alterações nas estruturas dos motores [86]. Além do aspecto regulatório em comum a todos os biocombustíveis, não foram detectadas mudanças significativas recentes visando o uso em motores marítimos. Dessa forma, o nível de maturidade tecnológica do SVO se mantém em estágio intermediário.

3.3.2.7. ETANOL

Em relação ao etanol, há avanços recentes com o uso direto do combustível em pilhas¹³ a combustível, aumentando a capacidade de densidade energética desse tipo de conversor energético [87]. Além disso, a produção de etanol já ser uma realidade e o Brasil é um dos maiores produtores do biocombustível [88]. O uso em motores de ignição de embarcações foi testado pela Wärtsilä, em parceria com a Raízen [89,90], que produz etanol de primeira e segunda geração¹⁴. Além disso, a empresa que fabrica motores firmou um acordo com a Compagnie Maritime Monégasque (CMM) para fornecer tais motores para a construção de 10 navios de apoio offshore [91]. Portanto, no que tange à maturidade tecnológica, o etanol apresentou um crescimento, chegando a um nível intermediário.

3.3.2.8. BIOMETANO LIQUEFEITO

A implementação do GNL como combustível primário para navios está se tornando rapidamente uma realidade comercial. Até outubro de 2024, 526 navios já faziam o uso do gás natural como combustível, e 280 terminais em todo o mundo apresentavam instalações de abastecimento para essas embarcações [79]. Conseqüentemente, a infraestrutura para abastecimento de GNL foi firmemente estabelecida, e todos os procedimentos necessários foram meticulosamente documentados por sociedades de classificação, com ênfase particular em navios petroleiros [92]. Assim, o GNL (Gás Natural Liquefeito) já opera em escala comercial consolidada, com crescente utilização no setor marítimo, impulsionado por sua viabilidade técnica e infraestrutura robusta de navios e portos.

Em contrapartida, o biometano, embora ainda em estágio intermediário de maturação tecnológica (TRL médio), apresenta grande potencial de crescimento. Em 2023, a produção mundial de biometano ultrapassou 9 bilhões de metros cúbicos, um volume ainda modesto frente à demanda global, mas que representa um avanço significativo, com a produção dobrando em relação a 2019. Acredita-se que, à medida que a oferta de biometano evoluir, será possível integrá-lo ao mercado marítimo utilizando a infraestrutura já existente para o GNL, visto que ambos podem ser liquefeitos e armazenados de maneira similar. Essa sinergia entre os combustíveis pode acelerar a adoção do biometano, ampliando sua relevância no contexto marítimo e contribuindo para a descarbonização do setor, embora sua competitividade dependa de avanços tecnológicos e de escala produtiva [93].

¹³ Pilhas a combustível com uso direto de etanol (do inglês Direct Ethanol Fuel Cell) utilizam o álcool por conta da instabilidade termodinâmica, o que os torna, a princípio, com maior facilidade de oxidar, e por conseguinte apresentam potencial de redução próximos do hidrogênio [137].

¹⁴ Biocombustíveis de primeira geração são produzidos de culturas alimentares, como milho e cana-de-açúcar, gerando conflitos entre produção de alimentos e energia e apresentando impactos ambientais limitados. Já os de segunda geração utilizam biomassas lignocelulósicas não-comestíveis, como resíduos agrícolas e florestais, evitando assim questões de segurança alimentar. Além disso, avanços tecnológicos permitem maior eficiência na conversão de celulose em combustíveis [138].

3.3.2.9. HDPO (ÓLEO DE PIRÓLISE HIDROTRATADO DO INGLÊS *HYDROTREATED PYROLYSIS OIL*)

Em relação à sua utilização em motores marítimos, a mistura de HDPO com diesel e álcool não deve exceder 40% v/v. Há uma perspectiva de que o HDPO possa servir como substituto do óleo pesado no futuro [94]. No entanto, sua adoção generalizada requer mais pesquisa e testes abrangentes [87]. Dessa forma, seu nível de desenvolvimento está em estágio inicial, e, portanto, o combustível apresenta um nível de maturidade baixo.

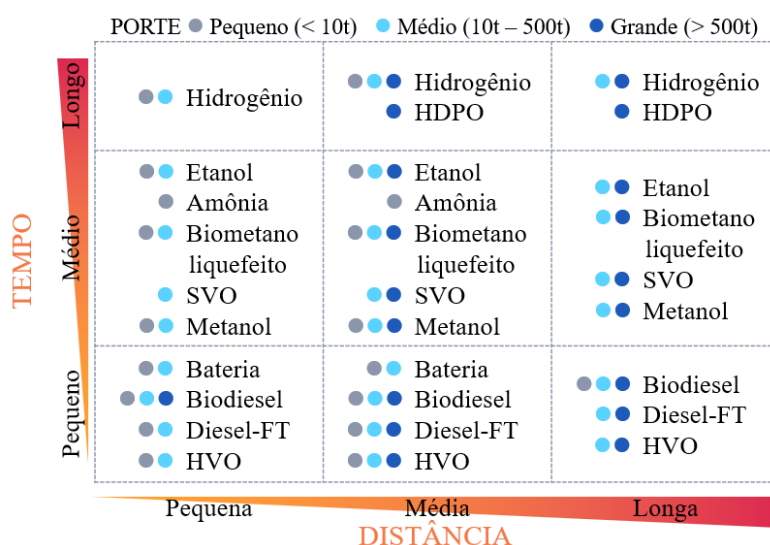
3.3.2.10. HIDROGÊNIO

Com relação ao hidrogênio, testes utilizando o combustível com motores de ignição em embarcações de pequeno porte [95], acordos para testes em embarcações de médio porte [96] e alguns navios de pequeno porte e em pequenas distâncias utilizando pilhas a combustível [4] foram alguns dos avanços recentes visando o uso do combustível. Em contrapartida, Amoni et al. [97] ressaltam a necessidade da realização de pesquisas adicionais para implementar o abastecimento de hidrogênio em portos brasileiros. Além disso, a produção de hidrogênio via rotas sustentáveis ainda é incipiente, além do custo ser alto [65] e a utilização com o sistema de propulsão mais eficiente (pilhas a combustível) ainda estar em fase de desenvolvimento. Diante do panorama apresentado, apresentou avanço, passando a ser considerado em estágio intermediário de maturidade, principalmente se considerado a queima em motores de ignição.

3.3.3. VIABILIDADE DE COMBUSTÍVEIS E TECNOLOGIAS DE REDUÇÃO DE EMISSÕES PARA O SETOR MARÍTIMO

A avaliação de viabilidade de incorporação dos combustíveis e tecnologias alternativas foi conduzida considerando as propriedades dos combustíveis, o estágio de desenvolvimento tecnológico e os aspectos econômicos pertinentes. Três critérios foram empregados para categorização: distância da rota da embarcação, porte dos navios e horizonte temporal. De maneira geral, o panorama da viabilidade dos combustíveis nos quesitos de horizonte temporal de estabelecimento pleno do combustível, distâncias percorridas¹⁵ e porte¹⁶ das embarcações, é apresentado na Figura 15.

Figura 15: Análise da viabilidade de combustíveis e tecnologias de redução de emissões para o setor marítimo para o ano de 2024.



Fonte: elaboração própria.

¹⁵ Rotas de até 100 quilômetros, como as de travessia dos rios, entre cidades próximas e entre locais próximos podem ser consideradas de curta distâncias. Já trajetos de até 1000 quilômetros, ligando locais intermunicipais ou até interestaduais, são consideradas rotas de distâncias médias. O transporte a distâncias superiores a 1000 quilômetros é considerado de longa distância.

¹⁶ Embarcações de pequeno porte são aquelas que transportam até 10 toneladas, exemplos são a maioria dos barcos que fazem o transporte de passageiros, como canoas, iates, lanchas, escunas, entre outros. As embarcações de médio porte abrangem a faixa entre 10 e 500 toneladas transportadas, como navios que fazem o transporte de passageiros com maior capacidade e alguns navios que transportam carga. Os navios de grande porte são aqueles que transportam mais de 500 toneladas.

3.3.3.1. PEQUENO PORTE

Para embarcações de pequeno porte, é considerado que estas são mais adequadas para trajetos de distâncias mais curtas, aqui assumido para distâncias inferiores a 1000 quilômetros. Isso se deve ao fato de que embarcações menores têm uma ênfase maior na travessia de passageiros ou na operação mista entre localidades próximas. Em relação ao uso de baterias, em outubro de 2024, sistemas de armazenamento de energia (Energy Storage System, ESS) já eram empregados em 324 navios [79]. Se comparado com 2023, uma grande diferença constatada é o biodiesel como sendo um combustível apto para o curto prazo, tendo em vista a aprovação do uso de misturas de combustíveis com até 24% de biodiesel v/v, bem como a comercialização. Além disso, o uso do HVO também se apresenta como uma opção viável a curto prazo, devido à sua semelhança com os combustíveis fósseis atuais, permitindo a adaptação relativamente simples dos sistemas de motorização existentes para utilizá-lo, sendo o mesmo caso do diesel FT.

Para o médio prazo, à medida que sistemas de conversão em propulsão compatíveis com metanol de biomassa e biometano liquefeito se tornam mais difundidos e esses combustíveis são produzidos em maior escala, eles também se tornam opções viáveis para embarcações de médio porte. Para o caso do biometano liquefeito, ainda é necessário também que a infraestrutura de abastecimento seja difundida no país. Além disso, destaca-se um aumento na maturidade do etanol, que anteriormente fora avaliado como opção para o longo prazo, passando a ser avaliado como combustível para o médio prazo, tendo em vista os testes e o início da construção de navios utilizando uma infraestrutura compatível como o combustível. Por fim, a amônia também surge como opção para o médio prazo, tendo em vista os testes que têm sido realizados e embarcações sendo construídas com motor de ignição compatível com o uso do combustível.

No longo prazo, há expectativas de massificação da tecnologia de pilha a combustível e redução nos preços do hidrogênio, além da viabilidade de produção alinhada com a competição de demanda dos demais setores, o que poderia tornar a opção adequadas para uso em embarcações pequenas entre os anos de 2040 e 2050.

3.3.3.2. MÉDIO PORTE

No caso das embarcações de médio porte, a avaliação para travessias de curta e média distância é similar aos das embarcações de pequeno porte. A diferença é que, no médio prazo, o uso do SVO se torna uma opção viável devido à capacidade das embarcações de médio porte acomodarem sistemas de aquecimento do combustível, necessários para a utilização do SVO. Para trajetos de longa distância, o uso de baterias deixa de ser viável, restando como alternativa o HVO. As opções de combustíveis para médio e longo prazo são semelhantes às das embarcações de pequeno porte, incluindo SVO, biometano liquefeito, amônia e etanol para o médio prazo, e hidrogênio para o longo prazo, possivelmente com o emprego de pilha a combustível.

3.3.3.3. GRANDE PORTE

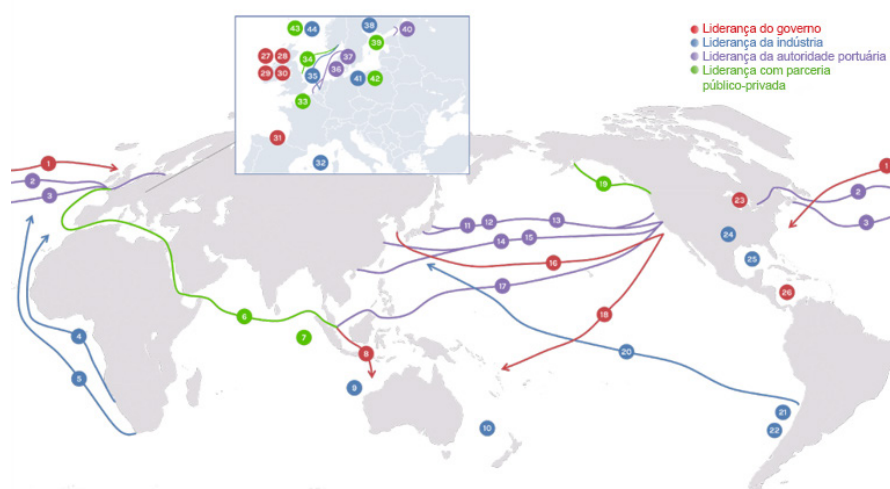
Já para as embarcações de grande porte, que são predominantemente utilizadas em trajetos de média e longa distância para transporte de carga, o uso de baterias não é considerado viável devido ao tamanho das embarcações e às maiores distâncias envolvidas. No curto prazo, o uso de HVO e Diesel FT é uma opção viável, proporcionando uma redução nas emissões de dióxido de carbono equivalente, com ressalta para o quesito econômico, dado o alto preço desses combustíveis. No médio e longo prazo, as opções de combustíveis são semelhantes às das embarcações de médio porte, incluindo biodiesel, SVO, biometano liquefeito, metanol, hidrogênio, amônia e etanol, com possíveis aplicações de pilha a combustível para o longo prazo.

3.3.4. CORREDORES VERDES

Os corredores verdes são rotas marítimas entre dois ou mais portos, nas quais as emissões de gases de efeito estufa são eliminadas por meio do uso de fontes de energia com emissão zeradas ou próximas de zero e ganharam destaque, tanto na comunidade naval quanto entre as lideranças globais, recentemente. Dada a demanda da IMO de tecnologias ou combustíveis com emissão nula ou próxima de zero para 2030, tal artifício se torna um potencial catalisador para facilitar a disseminação de combustíveis alternativos e, por conseguinte, atingir a meta de curto prazo. Durante a Conferência das Partes (COP) de novembro de 2021, foi estabelecido o objetivo de criar pelo menos seis corredores verdes até 2025 [98]. Para que isso aconteça, os portos envolvidos devem garantir a viabilidade de combustíveis sustentáveis e todos os responsáveis pelas rotas devem se comprometer a alocar recursos para a descarbonização dessas rotas [99].

Segundo Getting to Zero Coalition [100], em outubro de 2023, 44 corredores verdes estavam sendo analisados ou estavam em fase de implementação, com maior concentração na Europa, Ásia e América do Norte. A indústria está envolvida diretamente em 14 desses corredores, enquanto os governos e autoridades portuárias são responsáveis por 11 cada. Parcerias público-privadas participam de 8 corredores. A Figura 16 exibe as rotas planejadas e as respectivas lideranças de cada corredor.

Figura 16: corredores verdes em estudo ou implementação em 2023.



Fonte: adaptado de Getting to Zero Coalition [100].

Na Figura 16, é possível verificar que existem 3 corredores com origem na América do Sul, ambos saindo do Chile e focando nos seguintes produtos: concentrado de cobre, piscicultura e ácido sulfúrico. Portanto, dentre os corredores citados, nenhum contempla portos ou terminais brasileiros. Em um relatório preliminar feito em 2021, há a menção da rota de minério de ferro saindo dos portos brasileiros com destino aos países asiáticos, principalmente a China, porém apesar do estabelecimento do corredor na rota apresentar alto impacto de redução de emissão no contexto do setor marítimo, o trecho foi apontado como de baixa viabilidade para a conversão para uso de combustíveis de emissão reduzida ou nula por conta do alto custo [99].

Em relação aos combustíveis sustentáveis para essas rotas, o metanol se destaca como a principal opção energética em 14 corredores, seguido pela amônia, hidrogênio, eletricidade e biocombustíveis de segunda geração, discutidos em 9, 6, 4 e 2 corredores, respectivamente. Muitos dos corredores ainda não têm um tipo específico de embarcação definido, embora contêineres, ferries, navios *Ro-Ro* (*roll-on/roll-off*¹⁹), graneleiros e tanqueiros sejam os tipos de embarcações predominantes em 11, 8, 6 e 3 dos corredores analisados.

¹⁹Embarcações dedicadas para transporte de carga, que é carregada e descarregada com o auxílio de veículos ou sendo carga rolante através de rampas [139].

4. PANORAMA ATUAL DO SETOR BRASILEIRO PARA A DESCARBONIZAÇÃO

A descarbonização do setor de transporte marítimo brasileiro, assim como do setor de transportes em geral, está em curso por meio de esforços da indústria, do governo e de parcerias estratégicas. A transição energética do modal não deve se limitar ao uso de um único combustível alternativo, mas sim através da adoção de um conjunto combustíveis conforme às características das embarcações, disponibilidade de infraestrutura e produção local. Apesar de ainda necessitar de maior amadurecimento e propagação na comunidade brasileira, o tema de transição energética para embarcações do Brasil tem sido mais discutido, e algumas ações têm tido destaque.

Um primeiro movimento a ser destacado é datado em 2021, quando o Ministério de Minas e Energia (MME) do Brasil deu início a um programa com o propósito de promover a análise e o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis aplicáveis a todos os meios de transporte, incluindo o transporte marítimo. O governo brasileiro, em colaboração com a marinha e outras partes interessadas relevantes, regularmente promove encontros para debater e implementar medidas que favoreçam a redução das emissões de carbono no setor marítimo do país [101].

O projeto de lei “Combustíveis do Futuro”, anunciado em 2023, abrange uma série de ações voltadas para a descarbonização dos transportes. Isso inclui o aumento da proporção de etanol e biodiesel nas misturas de gasolina e diesel, respectivamente, a regulamentação de combustíveis sintéticos, a introdução gradual do diesel verde, a implementação da captura e armazenamento geológico de dióxido de carbono, e a integração progressiva do bioquerosene nas misturas de combustíveis para aviação [102]. Tal projeto foi sancionado em outubro de 2024 [103], com ênfase nos estímulos à produção de diesel verde, biometano e captura de carbono, que podem ser alguns dos pilares para a catalisação de medidas para a redução das emissões do modal marítimo no país. Além disso, existe a discussão para investimentos e estímulos para a produção de combustíveis com redução nas emissões de gases poluentes [104], além da regulamentação [105] e incentivo à produção [106] do hidrogênio como combustível.

Por outro lado, conforme citado na seção 3.3.1, a nova meta da IMO desencadeou o esforço da quantificação das emissões do ciclo de vida dos vetores energéticos utilizados por navios, o que acabou por levar a discussão das emissões indiretas, principalmente às mudanças indiretas de uso de solo, debate este fortemente calcado na produção de biocombustíveis. A quantificação das emissões associadas à mudança no uso da terra para a produção de biomassa é cercada de incertezas, uma vez que os fatores de emissão de ILUC relatados na literatura apresentam uma ampla variação de valores [107]. Desta forma, na reunião do MEPC, realizada em outubro de 2024, os representantes brasileiros defenderam que o país possui áreas que já foram utilizadas para pastagens e que possuem nível de

degradação médio ou severo, e que por sua vez, podem ser utilizadas para produção agrícola [20]. A produção de biomassa nessas áreas reduziria a competição entre a produção alimentícia e de combustíveis, e portanto reduziria as emissões de ILUC [108].

Do lado da indústria, os testes bem-sucedidos da mistura de 24% do volume da mistura de combustível com biodiesel, além da comercialização deste combustível, citados na seção 3.3.2, sintetizam a evolução do uso de recursos com menor emissão em embarcações nacionais. Além disso, destaca-se o início da comercialização de óleo diesel com 5% de HVO na mistura [109]. Em relação ao abastecimento de tais combustíveis em portos e terminais brasileiros, em julho de 2023, foi feito um acordo entre portos e empresas do setor marítimo brasileiro com o objetivo de promover a utilização de combustíveis alternativos [110]. Em setembro de 2024, essas organizações lançaram um guia com recomendações para a descarbonização de portos e embarcações brasileiras, com detalhes a respeito da eletrificação de equipamentos portuários e das embarcações, uso de combustíveis alternativos e corredores verdes [111]. Considerando o pequeno número de portos brasileiros com infraestrutura adequada para o abastecimento de combustíveis alternativos, essas iniciativas são vistas como essenciais para promover a modernização da infraestrutura marítima no Brasil [31]. Em relação a atual infraestrutura, os portos localizados na cidade Santos, Rio Grande, Paranaguá e Salvador possuem capacidade para abastecimento com amônia. Já os portos que possuem infraestrutura para abastecimento de metanol são os da cidade de Santos e Paranaguá [79]. Com relação ao biodiesel, desde 2013, combustível já é transportado por navios partindo de portos como Belém, Itacoatiara, Itaituba, Manaus, Paranaguá, Porto Velho, e Rio Grande. Além disso, o transporte de óleos vegetais (soja e palma), também já é feito através de terminais e portos de cidades de Barcarena, Belém, Manaus, Paranaguá, Porto Velho, Santos, Recife, Rio de Janeiro, Rio Grande, e Santarém [11]. Portanto, isso indica que tais terminais e portos já possuem infraestrutura para manuseio de óleos vegetais e seus derivados. Além disso, o Porto de Itaqui (MA) firmou uma parceria com a Transpetro em março de 2024 para viabilizar o abastecimento de diesel com percentual de HVO em sua mistura, além da adoção de combustíveis sustentáveis na frota e equipamentos do porto [112]. O Porto de Paranaguá planeja iniciar operações de abastecimento de GNL em 2025 [113] e avalia a instalação de uma planta de biodigestão para produzir biometano [114]. O Porto de Pecém propôs, em 2021, a criação de um hub de hidrogênio [115], adaptando sua infraestrutura para transporte e manuseio do combustível, com processos semelhantes aos de GNL e amônia. Já o Porto do Açu, em parceria com a Shell, planeja produzir e abastecer hidrogênio e amônia [116], enquanto o Porto de Suape também desenvolve projetos para o uso destes combustíveis [117].

Por fim, a Amazônia Legal também pode ser um importante ponto de partida: segundo dados disponíveis no relatório da Nova Economia da Amazônia [118], a região é fortemente dependente de embarcações para a movimentação de passageiros e cargas. Além disso, a região concentra mais de 50% da demanda energética brasileira do setor de transportes marítimos, com grande parte do transporte na região sendo feito, conforme a avaliação presumida em 3.3.2, para pequenas e médias distâncias e por pequenas embarcações. Assim, para esta região em específico, o transporte marítimo poderia ter investimentos para a eletrificação de embarcações de pequeno porte, mais suscetíveis ao armazenamento de energia em baterias.

5. AÇÕES PARA DESCARBONIZAÇÃO DO SETOR MARÍTIMO NORUEGUÊS

Em relação à Noruega, país com grande influência no transporte marítimo internacional, o país tem a maior frota de navios com sua bandeira, além de ser um dos líderes mundiais em relação à inovação de tecnologias marítimas [119]. Destaca-se também o papel da Noruega em relação à sustentabilidade, sendo o pioneiro na adoção de medidas de descarbonização do transporte marítimo. Embora projeções indiquem que, em 2023, as medidas adotadas pela Noruega, de forma geral, não sejam suficientes para atingir suas metas nacionais de redução de emissões no curto e longo prazo, o setor de transportes se destaca por estar alinhado com os objetivos estabelecidos para sua área [120]. Neste contexto, o transporte marítimo do país é um dos líderes na adoção de estratégias como combinando o uso de medidas de eficiência energética com combustíveis de menor emissão. Enquanto a frota mundial apresenta um quantitativo de aproximadamente 2% dos navios utilizando ou adequados para a utilização de combustíveis alternativos, cerca de 50% deste total são navios de bandeira norueguesa [121].

Em relação aos corredores verdes, dentre as 44 rotas anunciadas até novembro de 2023, 5 delas tem portos e/ou terminais noruegueses [100]. Nesse escopo, em março de 2024 foi aprovado a construção do primeiro terminal de abastecimento de amônia com emissões reduzidas na cidade norueguesa de *Florø*. Neste terminal, está planejada uma barcaça com a capacidade de 650 toneladas do combustível [122]. O investimento em embarcações que comportem vetores energéticos com baixo teor de carbono tem crescido. Em junho de 2024, a empresa estatal norueguesa ENOVA SF anunciou o investimento de 113 milhões de dólares para o financiamento de 15 projetos de navegação sustentável, dentre os quais 9 destes tem o foco em hidrogênio e 6 em amônia, com o objetivo principal de reduzir as diferenças de custos entre os combustíveis alternativos e tradicionais [123].

Além das ações do governo em prol da descarbonização do setor marítimo da Noruega, as empresas também tiveram importantes avanços nesse quesito. Um exemplo disso é o navio *Viking Energy*, que pertence à empresa norueguesa *Eidesvik* e presta serviços para a Equinor, será convertido para utilizar amônia em 2026 [124]. Além disso, a *Myklebust Verft*, um estaleiro norueguês, anunciou a construção de dois *ferries* movidos a hidrogênio verde e que irão operar em uma rota de 278 no círculo Ártico. A ideia é que essas embarcações utilizem hidrogênio verde como combustível para pelo menos 85% de suas operações, com biodiesel como alternativa. Cada um dos *ferries* está sendo projetado com 117 metros de comprimento, capacidade para até 120 carros e tem potencial de redução de até 26500 toneladas de CO₂ anualmente [125]. Por fim, pode-se destacar a inauguração de uma planta de larga escala de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS, do inglês *Carbon Capture and Storage*) na cidade norueguesa de *Øygarden*, cuja capacidade inicial será de armazenar cerca de 1,5 milhões de toneladas de CO₂ por ano [126].

6. OPORTUNIDADES DE COLABORAÇÃO ENTRE O BRASIL E NORUEGA

Embora situados em contextos diferentes, tanto Brasil quanto Noruega mantêm o investimento em medidas para a redução das emissões do setor marítimo. O país latino-americano tem investido fortemente em soluções relacionadas à biomassa, ao passo que o país europeu foca no uso de hidrogênio e amônia verdes. A Noruega mantém o seu posto de destaque no cenário de descarbonização do transporte marítimo, sendo pioneira no uso de pilhas combustível movidas a hidrogênio e no estabelecimento de um terminal de amônia verde.

Os investimentos em combustíveis derivados de biomassa, que tem potencial de facilitarem o cumprimento de objetivos de curto prazo da meta da IMO, além de serem de suma importância para o estabelecimento da transição energética do setor a longo prazo, são uma importante alternativa para o setor marítimo brasileiro. O debate da metodologia da análise de ciclo de vida, mais precisamente focado nas emissões indiretas relacionadas ao uso de terra, deve ser levado em conta e intensificado, pois conforme exposto no relatório, as incertezas por conta da grande variabilidade de fatores de emissão podem impactar fortemente não apenas as tomadas de decisão para o suprimento da demanda energética do setor, bem como toda a cadeia logística da economia global. Paralelo a isso, existem investimentos na produção de combustíveis como hidrogênio e amônia no Brasil [127], seguindo o exemplo da Noruega citado no Capítulo 5, de investimentos em combustíveis alternativos.

Um ponto de sinergia entre as nações são os investimentos feitos pela Noruega no fundo da Amazônia, cujo principal objetivo é o combate ao desflorestamento da floresta Amazônica [128]. Dessa forma, alinhado à essa iniciativa, uma ação potencial seria o compartilhamento da experiência de eletrificação de embarcações de pequeno e médio porte norueguesas para o caso da Amazônia Legal, dada a grande intensidade de uso das vias aquaviárias na região, principalmente para rotas de pequenas e médias distâncias. Além disso, a cooperação através da experiência do país europeu com políticas de precificação de carbono e incentivos para o uso de combustíveis alternativos pode ser feita, de forma a adaptar a medida ao contexto brasileiro.

Do ponto de vista de tecnologias de eficiência energética, parcerias entre empresas brasileiras e norueguesas estão sendo expandidas. Seguindo o exemplo citado anteriormente da parceria entre a Vale e Kongsberg para acompanhamento dos índices de consumo das embarcações da mineradora brasileira visando à otimização operacional [129], as empresas brasileiras Posidonia [130] e Locar [131] também passaram a utilizar a tecnologia da Kongsberg para otimização do consumo de suas frotas.

Por fim, tendo em vista a demanda da IMO de uso de ao menos 5% de combustíveis com índices de emissão nulos ou próximos de zero até 2030, reforça-se a alternativa do estabelecimento de corredores verdes, e, conforme visto

no Capítulo 5, existem 5 rotas anunciadas que englobam portos ou terminais noruegueses. Em contrapartida, não foram anunciadas rotas com origem ou destino no Brasil. Apesar disso, existem estudos que abordam rotas como as de minério de ferro [132] e soja entre Brasil e China [133], rotas estas que possuem grande demanda energética e importância para a economia do país. Tal esforço também pode ser feito para analisar possíveis rotas para o continente europeu, incluindo a Noruega, que recebe como principais produtos brasileiros o alumínio, petróleo e derivados e soja [134].

7. REFERÊNCIAS

- [1] Longarela-Ares Á, Calvo-Silvosa A, Pérez-López JB. The influence of economic barriers and drivers on energy efficiency investments in maritime shipping, from the perspective of the principal-agent problem. *Sustain* 2020;12:7943. <https://doi.org/10.3390/sui2197943>.
- [2] United Nations. *The First Global Integrated Marine Assessment*. Cambridge University Press; 2017. <https://doi.org/10.1017/9781108186148>.
- [3] UNCTAD. *Review of Maritime Transport 2024*. New York: 2024.
- [4] IEA. *Energy Technology Perspectives*. Paris: 2024. <https://doi.org/10.1787/9789264109834-en>.
- [5] van der Meulen S, Grijspaardt T, Mars W, van der Geest W, Roest-Crollius A, Kiel J. *Cost Figures for Freight Transport – final report*. Zoetermeer, NL: 2023.
- [6] Faber J, Hanayama S, Zhang S, Pereda P, Comer B, Hauerhof E, et al. *Fourth IMO GHG Report*. London, UK: 2021.
- [7] EPL. *Plano Nacional de Logística - 2035*. Brasília, Brazil: 2021.
- [8] IMO. *INITIAL IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS*. vol. 304. Londres: 2018.
- [9] IMO. *2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*. Resolition MEPC377(80) 2023. [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/annex/2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships.pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/annex/2023%20IMO%20Strategy%20on%20Reduction%20of%20GHG%20Emissions%20from%20Ships.pdf) (accessed August 1, 2023).
- [10] Smith TWP, Jalkanen JP, Anderson BA, Corbett JJ, Faber J, Hanayama S, et al. *Third IMO GHG Study 2014*. 2014. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0912-3>.
- [11] ANTAQ. *Anuário ANTAQ 2024*. <http://web.antaq.gov.br/ANUARIO/> (accessed June 24, 2021).
- [12] Wei H, Guedes R, Dantas G. *Alternativas de descarbonização para o setor de transporte marítimo no Brasil*. Rio de Janeiro, Brazil: 2023.
- [13] BNDES. *Portos 2021*. <https://hubdeprojetos.bndes.gov.br/pt/setores/Portos#1> (accessed June 22, 2021).
- [14] ANTAQ. *Relatório de Gestão 2022*. 2022.
- [15] EPE. *Balanco energético nacional (BEN) 2024: Ano base 2023 - Relatório Final*. Rio de Janeiro: 2024.
- [16] Comer B, Osipova L. *Accounting for well-to-wake carbon dioxide equivalent emissions in maritime transportation climate policies*. Washington: 2021.
- [17] EPE. *Balanco energético nacional (BEN) 2017: Ano base 2016 - Relatório Final*. Rio de Janeiro: 2017.
- [18] Serra P, Fancello G. *Towards the IMO's GHG goals: A critical overview of the perspectives and challenges of the main options for decarbonizing international shipping*. *Sustain* 2020;12:3220. <https://doi.org/10.3390/sui2083220>.
- [19] Bouman EA, Lindstad E, Riialand AI, Strømman AH. *State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review*. *Transp Res Part D Transp Environ* 2017;52:408-21. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.022>.
- [20] Marinha do Brasil. *Brasil participa de debates na IMO sobre transição energética no mar 2024*. <https://www.agencia.marinha.mil.br/meio-ambiente/brasil-participa-de-debates-na-imo-sobre-transicao-energetica-no-mar> (accessed November 8, 2024).
- [21] Nikolakaki G. *Economic incentives for maritime shipping relating to climate protection*. *WMU J Marit Aff* 2013;12:17-39. <https://doi.org/10.1007/s13437-012-0036-z>.
- [22] Balcombe P, Brierley J, Lewis C, Skatvedt L, Speirs J, Hawkes A, et al. *How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies*. *Energy Convers Manag* 2019;182:72-88. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.080>.
- [23] Geerlings H, Kuipers B, Zuidwijk R. *Ports and Networks: Strategies, Operations and Perspectives*. First. New York: Taylor & Francis Group; 2018.
- [24] Fagerholt K, Laporte G, Norstad I. *Reducing fuel emissions by optimizing speed on shipping routes*. *J Oper Res Soc* 2010;61:523-9. <https://doi.org/10.1057/jors.2009.77>.
- [25] Winnes H, Styhre L, Fridell E. *Reducing GHG emissions from ships in port areas*. *Res Transp Bus Manag* 2015;17:73-82. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2015.10.008>.
- [26] Viktorelius M. *Adoption and use of energy-monitoring technology in ship officers' communities of practice*. *Cogn Technol Work* 2020;22:459-71. <https://doi.org/10.1007/s10111-019-00578-z>.
- [27] DNV. *Maritime Forecast to 2050*. Oslo: 2024.
- [28] Clark A, Ives M, Fay B, Lambe R, Schiele J, Larsson L, et al. *Zero-Emissions Shipping: Contracts-for-difference as incentives for the decarbonisation of international shipping 2021*.
- [29] Brynolf S. *Environmental Assessment of Present and Future Marine Fuels*. 2014.
- [30] Xing H, Stuart C, Spence S, Chen H. *Alternative fuel options for low carbon maritime transportation: Pathways to 2050*. *J Clean Prod* 2021;297:126651. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126651>.
- [31] Wei H, Müller-Casseres E, Belchior CRP, Szklo A. *Evaluating the Readiness of Ships and Ports to Bunker and Use Alternative Fuels: A Case Study from Brazil*. *J Mar Sci Eng* 2023;11:1856. <https://doi.org/10.3390/jmse1101856>.

- [32] Fan L, Gu B, Luo M. A cost-benefit analysis of fuel-switching vs. hybrid scrubber installation: A container route through the Chinese SECA case. *Transp Policy* 2020;99:336–44. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.09.008>.
- [33] Yang J, Tang T, Jiang Y, Karavalakis G, Durbin TD, Wayne Miller J, et al. Controlling emissions from an ocean-going container vessel with a wet scrubber system. *Fuel* 2021;304:121323. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121323>.
- [34] Lin CY. Strategies for promoting biodiesel use in marine vessels. *Mar Policy* 2013;40:84–90. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2013.01.003>.
- [35] Gallopin G, Hammond A, Raskin PD, Swart R. Branch Points: Global Scenarios and Human Choice. *Stock Environ InstitutelSBN* 1997;91:88714.
- [36] Bengtsson S, Andersson K, Fridell E. A comparative life cycle assessment of marine fuels: Liquefied natural gas and three other fossil fuels. *Proc Inst Mech Eng Part M J Eng Marit Environ* 2011;225:97–110. <https://doi.org/10.1177/1475090211402136>.
- [37] Müller-Casseres E, Carvalho F, Nogueira T, Fonte C, Império M, Poggio M, et al. Production of alternative marine fuels in Brazil: An integrated assessment perspective. *Energy* 2021;219. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119444>.
- [38] Müller-Casseres E, Leblanc F, van den Berg M, Fragkos P, Dessens O, Naghash H, et al. International shipping in a world below 2°C. *Nat Clim Chang* 2024. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-01997-1>.
- [39] Faber J, Hanayama S, Zhang S, Pereda P, Comer B, Hauerhof E, et al. Fourth IMO GHG Study 2020. 2020. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- [40] DNV GL. Maritime Forecast To 2050. 2020.
- [41] Neste. Neste Renewable Diesel Handbook. Espoo: 2020.
- [42] Rutz D, Janssen R, Reumerman P, Spekreijse J, Matschegg D, Bacovsky D, et al. Technical options for retrofitting industries with bioenergy. 1st ed. Munich: 2020.
- [43] Petrobras. Diesel renovável traz mais qualidade, competição e sustentabilidade para o segmento de biocombustíveis no Brasil. Artigo 2020. https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/diesel-renovavel-traz-mais-qualidade-competicao-e-sustentabilidade-para-o-segmento-de-biocombustiveis-no-brasil.htm?gclid=EAlaIqobChMI_92s05vn7gIViQIRCh0mKgOuEAAVASAAEgL30vD_BwE.
- [44] Mohd Noor CW, Noor MM, Mamat R. Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;94:127–42. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.031>.
- [45] DNV GL. Part 6 Additional class notations Chapter 2 Propulsion, power generation and auxiliary systems. 2020.
- [46] DNV GL. Comparison of Alternative Marine Fuels. Oslo, Norway: 2019.
- [47] Carvalho F, Müller-Casseres E, Poggio M, Nogueira T, Fonte C, Wei HK, et al. Prospects for carbon-neutral maritime fuels production in Brazil. *J Clean Prod* 2021;326:129385. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129385>.
- [48] Schuller O, Whitehouse S, Poulsen J, Stoffregen A, Hengstler J, Kupferschmid S. Life Cycle GHG Emission Study on the Use of LNG as Marine Fuel. 2019.
- [49] Burel F, Taccani R, Zuliani N. Improving sustainability of maritime transport through utilization of Liquefied Natural Gas (LNG) for propulsion. *Energy* 2013;57:412–20. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.05.002>.
- [50] Ellis J, Tanneberger K. Study on the use of ethyl and methyl alcohol as alternative fuels in shipping. 2015.
- [51] Ammar NR. An environmental and economic analysis of methanol fuel for a cellular container ship. *Transp Res Part D Transp Environ* 2019;69:66–76. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.02.001>.
- [52] Torres-García M, García-Martín JF, Jiménez-Espadafor Aguilar FJ, Barbin DF, Álvarez-Mateos P. Vegetable oils as renewable fuels for power plants based on low and medium speed diesel engines. *J Energy Inst* 2020;93:953–61. <https://doi.org/10.1016/j.joel.2019.08.006>.
- [53] Kesieme U, Pazouki K, Murphy A, Chrysanthou A. Biofuel as an alternative shipping fuel: technological, environmental and economic assessment. *Sustain Energy Fuels* 2019;3:899–909. <https://doi.org/10.1039/C8SE00466H>.
- [54] Ushakov S, Lefebvre N. Assessment of Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) Applicability as an Alternative Marine Fuel Based on Its Performance and Emissions Characteristics. *SAE Int J Fuels Lubr* 2019;12:4–12. <https://doi.org/10.4271/104-12-02-0007>.
- [55] Engman MA, Hartikka T, Honkanen M, Kiiski U, Kuronen M, Mik- S, et al. Hydrotreated vegetable oil (HVO) - premium renewable biofuel for diesel engines. Espoo: 2014.
- [56] IEA. Biofuels for the marine shipping sector: An overview and analysis of sector infrastructure, fuel technologies and regulations. 2017;86. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/02/Marine-biofuel-report-final-Oct-2017.pdf> (accessed November 25, 2020).
- [57] Laursen R, Barcarolo D, Patel H, Dowling M, Penfold M, Faber J, et al. Update on potential of biofuels in shipping. Lisbon: 2022.
- [58] Veses A, Martínez JD, Callén MS, Murillo R, García T. Application of upgraded drop-in fuel obtained from biomass pyrolysis in a spark ignition engine. *Energies* 2020;13:1–15. <https://doi.org/10.3390/en13082089>.
- [59] Mohd Noor CW, Noor MM, Mamat R. Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;94:127–42. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.031>.
- [60] Kass M, Abdullah Z, Bidy M, Drennan C, Hawkins T, Jones S, et al. Understanding the Opportunities of Biofuels for Marine Shipping. Springfield, VA: 2018.
- [61] Huang Y. Conversion of a Pilot Boat to Operation on Methanol. Chalmers University of Technology, 2015.

- [62] Hansson J, Brynolf S, Fridell E, Lehtveer M. The potential role of ammonia as marine fuel-based on energy systems modeling and multi-criteria decision analysis. *Sustain* 2020;12:3265. <https://doi.org/10.3390/SUI2083265>.
- [63] Lewis J. *Fuels Without Carbon: Prospects and the Pathway Forward for Zero-Carbon Hydrogen and Ammonia Fuel*. 2018.
- [64] Sheriff AM, Tall A. Assessment of ammonia ignition as a maritime fuel, using engine experiments and chemical kinetic simulations. World Maritime University, 2019.
- [65] ABS. *Low Carbon Shipping*. 2019.
- [66] Kim K, Roh G, Kim W, Chun K. A preliminary study on an alternative ship propulsion system fueled by ammonia: Environmental and economic assessments. *J Mar Sci Eng* 2020;8:183. <https://doi.org/10.3390/jmse8030183>.
- [67] Earl T, Ambel CC, Hemmings B, Gilliam L, Abbasov F, Officer S. *Roadmap to decarbonising European Shipping*. Brussels: 2018.
- [68] Svanberg M, Ellis J, Lundgren J, Landälv I. Renewable methanol as a fuel for the shipping industry. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;94:1217-28. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.058>.
- [69] Hansson J, Fridell E, Brynolf S. *On the potential of ammonia as fuel for shipping – A synthesis of knowledge*. Göteborg, Sweden: 2019.
- [70] Rakopoulos DC, Rakopoulos CD, Giakoumis EG. Impact of properties of vegetable oil, bio-diesel, ethanol and n-butanol on the combustion and emissions of turbocharged HDDI diesel engine operating under steady and transient conditions. *Fuel* 2015;156:1-19. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.021>.
- [71] IMO. *Resolution MEPC.376(80): Guidelines on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels (LCA Guidelines)*. 2023.
- [72] IPCC. *Climate Change 2014 - Synthesis Report*. Geneva, Switzerland: IPCC; 2015.
- [73] Zincir BA, Arslanoglu Y. Comparative Life Cycle Assessment of Alternative Marine Fuels. *Fuel* 2024;358:129995. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129995>.
- [74] IMO. *MEPC.1/Circ.795/Rev.6: Unified Interpretations to MARPOL Annex VI*. London: 2022.
- [75] Mærsk Mc-Kinney Møller Center. *Using bio-diesel onboard vessels: An overview of fuel handling and emission management considerations*. 2023.
- [76] World Fuel Services. *ISO 8217 2017: Fuel Standard for marine distillate fuels*. 2019.
- [77] Petrobras. *Petrobras realiza comercialização de bunker com conteúdo renovável 2024*. <https://agencia.petrobras.com.br/w/negocio/petrobras-realiza-comercializacao-de-bunker-com-conteudo-renovavel> (accessed November 2, 2024).
- [78] ANP. *Autorização ANP No 208, de 12 de abril de 2024*. <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/autorizacao-anp-n-208-de-12-de-abril-de-2024-553914628> (accessed November 2, 2024).
- [79] DNV GL. *Alternative Fuels Insight 2024*. <https://afi.dnvgl.com/> (accessed June 25, 2024).
- [80] No SY. Application of hydrotreated vegetable oil from triglyceride based biomass to CI engines - A review. *Fuel* 2014;115:88-96. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.001>.
- [81] Winnes H, Fridell E, Hansson J, Jivén K. *Biofuels for low carbon shipping*. 2019.
- [82] Wärtsilä. *Wärtsilä 25: The power to target net zero*. Helsinki: 2024.
- [83] ARUP, E4tech, Ricardo-AEA. *Advanced Biofuel Demonstration Competition Feasibility Study Annex 1 : Technology status update*. 2014.
- [84] ETIP FT-liquids 2019. <https://www.etipbioenergy.eu/value-chains/products-end-use/products/ft-liquids> (accessed April 11, 2022).
- [85] Van Uy D, The Nam T. Fuel Continuous Mixer - an Approach Solution to Use Straight Vegetable Oil for Marine Diesel Engines. *TransNav, Int J Mar Navig Saf Sea Transp* 2018;12:151-7. <https://doi.org/10.12716/1001.12.01.17>.
- [86] No SY. Application of straight vegetable oil from triglyceride based biomass to IC engines – A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;69:80-97. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.007>.
- [87] Chang J, Wang G, Chang X, Yang Z, Wang H, Li B, et al. Interface synergism and engineering of Pd/Co@N-C for direct ethanol fuel cells. *Nat Commun* 2023;14:1-15. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37011-z>.
- [88] Dincer I, Siddiqui O. *Ammonia Fuel Cells*. vol. 1. Amsterdam: Elsevier; 2020.
- [89] Wärtsilä. *Wärtsilä Decarbonisation Modelling agreement supports Raizen's commitment to reducing marine sector's GHG emissions 2023*. <https://www.wartsila.com/media/news/23-10-2023-wartsila-decarbonisation-modelling-agreement-supports-raizen-s-commitment-to-reducing-marine-sector-s-ghg-emissions-3342427> (accessed November 2, 2024).
- [90] Raizen. *Raizen e Wärtsilä assinam acordo para acelerar a sustentabilidade no setor marítimo com navios movidos a etanol 2023*. <https://www.raizen.com.br/sala-de-imprensa/raizen-e-waertsilae-assinam-acordo-para-acelerar-a-sustentabilidade-no-setor-maritimo-com-navios-movidos-a-etanol> (accessed November 3, 2024).
- [91] CMM. *CMM has entered into a Memorandum of Understanding with Wärtsilä to develop the first Platform Supply Vessels (PSVs) powered by ethanol 2024*. https://www.linkedin.com/posts/compagnie-maritime-monegasque_cmm-has-entered-into-a-memorandum-of-understanding-activity-7232034786322567169-OJhZ?utm_source=share&utm_medium=member_desktop (accessed November 8, 2024).
- [92] American Bureau of Shipping. *Propulsion and auxiliary systems for gas fuelled ships*. 2011.

- [93] IGU, SNAN, RystadEnergy. Global Gas Report 2024. London: 2024.
- [94] Chong KJ, Bridgewater A V. Fast Pyrolysis Oil Fuel Blend for Marine Vessels. *Environ Prog Sustain Energy* 2014;36:677-684. <https://doi.org/10.1002/ep>.
- [95] Baird Maritime. VESSEL REVIEW | Hydrocat 48 – Netherlands' Windcat Workboats puts hydrogen-fuelled newbuild in operation 2022. <https://www.bairdmaritime.com/offshore/vessels-rigs/crewboats/vessel-review-hydrocat-48-netherlands-windcat-workboats-puts-hydrogen-fuelled-newbuild-in-operation> (accessed November 5, 2024).
- [96] J-Eng. Hydrogen-fueled Vessel Wins AiP Towards Demonstration Operation. Akashi, Japan: 2023.
- [97] Amoni M, Rymer J, Valentim L, Margulis S, Silva R, Pitta G, et al. Diagnóstico de Descarbonização, Infraestrutura e aplicação do Hidrogênio nos Portos. Belo Horizonte: 2024.
- [98] Government of United Kingdom. COP26: Clydebank Declaration for green shipping corridors 2023. <https://www.gov.uk/government/publications/cop-26-clydebank-declaration-for-green-shipping-corridors/cop-26-clydebank-declaration-for-green-shipping-corridors> (accessed January 12, 2024).
- [99] Getting to Zero Coalition. The Next Wave: Green Corridors 2021:1-74.
- [100] Getting to Zero Coalition. Annual Progress Report on Green Shipping Corridors 2023. Copenhagen: 2023.
- [101] MME. Programa Combustível do Futuro 2023. <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-combustivel-do-futuro> (accessed July 5, 2023).
- [102] Assessoria Especial de Comunicação Social. Governo entrega Projeto de Lei do Combustível do Futuro 2023. <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/governo-entrega-projeto-de-lei-do-combustivel-do-futuro> (accessed November 8, 2023).
- [103] MME. ANP autoriza comercialização de combustível marítimo com biodiesel 2024. https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/anp-autoriza-comercializacao-de-combustivel-maritimo-com-biodiesel (accessed November 8, 2024).
- [104] Assessoria Especial de Comunicação Social. Novo PAC mira em combustíveis de baixo carbono para a promoção da transição energética 2023. <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/novo-pac-mira-em-combustiveis-de-baixo-carbono-para-a-promocao-da-transicao-energetica> (accessed November 13, 2023).
- [105] Assessoria Especial de Comunicação Social. MME apresenta proposta de Projeto de Lei do Hidrogênio ao "Conselhão" 2023. <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-proposta-de-projeto-de-lei-do-hidrogenio-ao-2018conselhao2019> (accessed November 13, 2023).
- [106] Ministério de Minas e Energia. Chamada pública para seleção de hubs de hidrogênio de baixa emissão de carbono para descarbonização da indústria brasileira 2024. <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1/iii-planejamento-energetico/chamada-publica-de-hubs-de-h2#:~:text=0> Brazil-UK Hydrogen Hub, o Desenvolvimento Industrial (UNIDO). (accessed November 8, 2024).
- [107] Maia RGT, Bozelli H. The importance of GHG emissions from land use change for biofuels in Brazil: An assessment for current and 2030 scenarios. *Resour Conserv Recycl* 2022;179. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106131>.
- [108] Bordonal R de O, Carvalho JLN, Lal R, de Figueiredo EB, de Oliveira BG, La Scala N. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. *Agron Sustain Dev* 2018;38. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0490-x>.
- [109] Petrobras. Petrobras dá início à comercialização de diesel com conteúdo renovável em São Paulo 2024. <https://agencia.petrobras.com.br/w/negocio/petrobras-da-inicio-a-comercializacao-de-diesel-com-conteudo-renovavel-em-sao-paulo> (accessed November 8, 2024).
- [110] Rede Brasil. Pacto Global da ONU no Brasil lança GT de Negócios Oceânicos para impulsionar a descarbonização de portos e transportes marítimos 2023. <https://www.pactoglobal.org.br/noticia/676/pacto-global-da-onu-no-brasil-lanca-gt-de-negocios-oceanicos-para-impulsionar-a-descarbonizacao-de-portos-e-transportes-maritimos> (accessed July 30, 2023).
- [111] Pacto Global. Acelerando a Descarbonização Portuária e Marítima no Brasil. São Paulo: 2024.
- [112] Petrobras. Transpetro firma parceria estratégica para descarbonização do Porto de Itaquí 2024. <https://transpetro.com.br/transpetro-institucional/noticias/transpetro-firma-parceria-estrategica-para-descarbonizacao-do-porto-de-itaqui.htm> (accessed November 10, 2024).
- [113] Reis RG. Nimofast signed a partnership with Kanfer Shipping to sell and deliver LNG via small-scale LNG 2022. <https://www.nimofast.com/post/nimofast-signed-a-partnership-with-kanfer-shipping-to-sell-and-deliver-lng-via-small-scale-lng> (accessed January 10, 2023).
- [114] Portos do Paraná. Relatório de 2021: Sustentabilidade. 2021.
- [115] Pecém. Hub de Hidrogênio Verde no Complexo de Pecém 2021. <https://www.complexodopecem.com.br/hubh2v/>, (accessed August 20, 2023).
- [116] Porto do Açu. Relatório de Sustentabilidade 2021. 2021.
- [117] Engie. Porto de Suape quer construir planta de hidrogênio verde estimada em US\$ 3,5 bi 2022. <https://www.alemdaenergia.engie.com.br/porto-de-suape-quer-construir-planta-de-hidrogenio-verde-estimada-em-us-35-bi/> (accessed August 20, 2023).
- [118] Nobre CA, Feltran-Barbieri R, de Assis Costa F, Haddad EA, Schaeffer R, Domingues EP, et al. Nova Economia da Amazônia. São Paulo, Brazil: 2023. <https://doi.org/10.46830/wriprt.22.00034>.
- [119] Makitie T, Steen M, Saether EA, Bjørgum Ø, Poulsen RT. Norwegian ship-owners' adoption of alternative fuels. *Energy Policy* 2022;163:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112869>.
- [120] DNV AS. Energy Transition Norway 2023. Høvik, Norway: 2023.
- [121] Norwegian Shipowner's Association. Maritime outlook 2024. Oslo: 2024.

- [122] uuk A. Green light for world's first ammonia bunkering terminal 2024. <https://www.offshore-energy.biz/green-light-for-worlds-first-ammonia-bunkering-terminal/> (accessed November 11, 2024).
- [123] Prevljak NH. Fifteen green ship projects get \$113.5M in Enova support 2024. <https://www.offshore-energy.biz/fifteen-green-ship-projects-get-113-5m-in-enova-support/> (accessed November 11, 2024).
- [124] Wärtsilä. Landmark deal between Wärtsilä and Eidesvik Offshore pioneers growing demand for ammonia in shipping 2024. <https://www.wartsila.com/media/news/26-08-2024-landmark-deal-between-wartsila-and-eidesvik-offshore-pioneers-growing-demand-for-ammonia-in-shipping-3485578> (accessed November 11, 2024).
- [125] Prevljak NH. Norwegian shipyard to build the 'world's largest' hydrogen-powered ships 2024. <https://www.offshore-energy.biz/norwegian-shipyard-to-build-the-worlds-largest-hydrogen-ships/> (accessed November 11, 2024).
- [126] Equinor. Northern Lights ready to receive CO₂ 2024. <https://www.equinor.com/news/20240926-northern-lights-ready-to-receive-co2> (accessed November 11, 2024).
- [127] Ministério de Minas e Energia. Governo Federal garante investimentos para impulsionar produção de hidrogênio verde no Brasil 2024. <https://www.gov.br/secom/pt-br/assuntos/noticias/2024/06/governo-federal-garante-investimentos-para-impulsionar-producao-de-hidrogenio-verde-no-brasil> (accessed November 11, 2024).
- [128] Planalto. Norway announces R\$250 million donation to the Amazon Fund at COP28 2023. <https://www.gov.br/planalto/en/latest-news/2023/12/norway-announces-r-250-million-donation-to-the-amazon-fund-at-cop28> (accessed November 11, 2024).
- [129] Kongsberg. Vale and Kongsberg Digital Join Forces to Reduce Emissions 2023. <https://kongsbergdigital.com/news/vale-and-kongsberg-digital-join-forces-to-reduce-emissions/> (accessed May 23, 2023).
- [130] Kongsberg. Kongsberg Digital to Digitalise Brazilian Offshore and Merchant Shipping Company Posidonia 2023. <https://www.kongsbergdigital.com/resources/kongsberg-digital-to-digitalise-brazilian-offshore-and-merchant-shiping-company-posidonia> (accessed November 11, 2024).
- [131] Kongsberg. Kongsberg Digital to Digitalise Brazilian Offshore Vessel Operator Locar 2023. <https://www.kongsbergdigital.com/resources/kongsberg-digital-to-digitalise-brazilian-offshore-vessel-operator-locar> (accessed November 11, 2024).
- [132] Viana L de BP. Avaliação de um Corredor Verde entre Brasil e China para Transporte Marítimo de Minério de Ferro com Uso do Metanol. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2023.
- [133] Carvalho F, Müller-Casseres E, Portugal-Pereira J, Junginger M, Szklo A. Lignocellulosic biofuels use in the international shipping: The case of soybean trade from Brazil and the U.S. to China. *Clean Prod Lett* 2023;4:100028. <https://doi.org/10.1016/j.cpl.2023.100028>.
- [134] MDIC. ComexVis 2024. <https://comexstat.mdic.gov.br/pt/comex-vis> (accessed November 11, 2024).
- [135] EMBRAPA. Embrapa representa o Brasil em debate internacional pela descarbonização do transporte marítimo 2024. <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202403/embrapa-representa-o-brasil-em-debate-internacional-pela-descarbonizacao-do-transporte-maritimo> (accessed December 2, 2024).
- [136] IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2022.
- [137] Berretti E, Osmieri L, Baglio V, Miller HA, Filippi J, Vizza F, et al. Direct Alcohol Fuel Cells: A Comparative Review of Acidic and Alkaline Systems. vol. 6. Springer Nature Singapore; 2023. <https://doi.org/10.1007/s41918-023-00189-3>.
- [138] Jayakumar M, Bizuneh Gebeyehu K, Deso Abo L, Wondimu Tadesse A, Vivekanandan B, Prabhu Sundramurthy V, et al. A comprehensive outlook on topical processing methods for biofuel production and its thermal applications: Current advances, sustainability and challenges. *Fuel* 2023;349:128690. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128690>.
- [139] Port of Rotterdam. General Terms and Conditions. Including Port Tariffs. Rotterdam, The Netherlands: 2021.

Conselho Curador CEBRI

Presidente

José Pio Borges

Presidente Emérito

Fernando Henrique Cardoso

Diretora-Presidente

Julia Dias Leite

Vice-Presidentes

José Alfredo Graça Lima

Luiz Ildefonso Simões Lopes

Vice-Presidentes Eméritos

Daniel Klabin

José Botafogo Gonçalves

Luiz Augusto de Castro Neves

Rafael Benke

Conselheiros Eméritos

Izabella Teixeira

Luiz Felipe de Seixas Corrêa

Luiz Fernando Furlan

Marcos Azambuja

Pedro Malan

Rubens Ricupero

Winston Fritsch

Fundadores

Carlos Mariani Bittencourt

Celso Lafer

Daniel Klabin

Gelson Fonseca Jr.

João Clemente Baena Soares

Marcus Vinicius Pratini de Moraes

Maria do Carmo (Kati) Nabuco de Almeida Braga

Roberto Teixeira da Costa

Eliezer Batista da Silva *(in memoriam)*

Luciano Martins de Almeida *(in memoriam)*

Luiz Felipe Palmeira Lampreia *(in memoriam)*

Luiz Olavo Baptista *(in memoriam)*

Sebastião do Rego Barros Netto *(in memoriam)*

Walter Moreira Salles *(in memoriam)*

Conselheiros

Ana Toni

André Clark

André Corrêa do Lago

André Lara Resende

Armando Mariante

Arminio Fraga

Clarissa Lins

Demétrio Magnoli

Edmar Bacha

Francisco Müssnich

Henrique Rzezinski

Ilona Szabó

Joaquim Falcão

José Aldo Rebelo

José Luiz Alquéres

Marcos Galvão

Marcos Jank

Maria Luiza Viotti

Paulo Hartung

Pedro Henrique Mariani

Renato Galvão Flôres Junior

Roberto Abdenur

Roberto Jaguaribe

Ronaldo Veirano

Tomas Zinner

Vitor Hallack

Conselho Consultivo Internacional

Albert Fishlow
Alfredo Valladão
Antonio Patriota
Felix Peña
Flávio Damico
Hussein Kalout
Ivan Sandra
Jackson Schneider
Joaquim Levy
Leslie Bethell
Marcos Caramuru
Monica de Bolle
Paolo Bruni
Sebastião Salgado
Victor do Prado

Pesquisadores Sêniores

Antonia Aparecida Quintão
Antonio Lavareda
Daniela Campello
Danilo Marcondes
Ernesto Mané
Gregório Cruz Araújo Maciel
Guilherme Dantas
José Juni Neto
Louise Marie Huriel
Marcus André Melo
Marina de Mello e Souza
Monique Sochaczewski
Natália Dias
Patrícia Perrone
Raphael Gustavo Frischgesell

Senior Fellows

Abrão Neto
Ana Paula Tostes
Andrea Hoffmann
Antonio Augusto Martins Cesar
Carlos Milani
Carlos Pereira
Daniela Lerda
Dawisson Belém Lopes
Evangelina Seiler
Fernanda Cimini
Fernanda Magnotta
Francisco Gaetani
Guilherme Casarões
José Mário Antunes
Kai Lehmann
Larissa Wachholz
Lia Valls Pereira
Maria Hermínia Tavares
Maria Netto
Marianna Albuquerque
Mônica Sodré
Paulo Sergio Melo de Carvalho
Philip Yang
Rafaela Guedes
Ricardo Ramos
Ricardo Sennes
Ronaldo Carmona
Sergio Gusmão Suchodolski
Tatiana Rosito

Empresas associadas

ABEEólica
Aegea
Amazon Web Services (AWS)
Lorinvest
ApexBrasil
Banco Bocom BBM
BASF
LTS Investments
Machado Meyer
BHP Billiton
BMA Advogados
Microsoft
BNDES
BP
BRF
Brookfield Brasil
Museu do Amanhã
Cargill
Neoenergia
Origem Energia
Consulado Geral da Bélgica no Rio de Janeiro
PATRI
Consulado Geral da Irlanda em São Paulo
Consulado Geral do México no Rio de Janeiro
Consulado Geral da Noruega no Rio de Janeiro
Petrobras
Consulado Geral dos Países Baixos no Rio de Janeiro
Dynamo
Pinheiro Neto Advogados
EDP
Prefeitura do Rio de Janeiro
Eletrobras
Prefeitura de São Paulo
Embaixada da China no Brasil
Promon Engenharia

Embaixada da Suíça
Embaixada do Reino Unido
Embraer
Prumo Logística
ENEVA
PUC-Rio
ENGIE Brasil
Sanofi
Equinor
Etel Design
Shell
Siemens
ExxonMobil
Siemens Energy
Galp
SPIC Brasil
Grupo Ultra
State Grid
Huawei
IBÁ
IBRAM
Suzano
Instituto Arapyau
Instituto Clima e Sociedade
Syngenta
Itaú Unibanco
JBS
Total Energies
Altera
Klabin
UNICA
Vale
Veirano Advogados
Vinci Partners
Volkswagen Caminhões e Ônibus
Finep

Equipe CEBRI

Diretora-Presidente
Julia Dias Leite

Diretora de Projetos
Luciana Gama Muniz

Diretor Acadêmico
Feliciano de Sá Guimarães

Projetos

Diretora Adjunta de Projetos
Léa Reichert

Diretora Adjunta de Parcerias e
Cooperação Internacional
Teresa Rossi

Gerente de Projetos
Tháís Jesinski Batista

Especialista em Energia e
Mudanças Climáticas
Julia Paletta

Gerente de Projetos T20
Beatriz Pfeifer

Coordenador de Projetos
Gustavo Bezerra

Coordenadora de Projetos
Isabella Ávila

Coordenadora de Projetos
Laís de Oliveira Ramalho

Coordenadora de Projetos
Laura Escudeiro de Vasconcelos

Coordenador de Projetos T20
Iuri Rosario

Analista de Projetos Jr.
Catarina Werlang

Analista de Projetos
Daniel Fontes

Assistente de Projetos
Felipe Cristovam

Assistente de Projetos T20
Fabricio de Martino

Estagiário de Projetos
Leonardo David Silva dos Santos

Estagiário T20
Marcelo Gribel

Estagiária Projetos
Maria Fernanda Ferreira

Estagiário T20
Rodrigo Barreto

Relações Institucionais e Governamentais

Diretor de Relações Corporativas
Henrique Villela

Gerente de Relações Corporativas
Paula Lottenberg

Coordenadora de Relações Corporativas
Jessica Ausier da Costa

Estagiário de Relações Corporativas
Eric Porto Moreno

Relações Institucionais e Governamentais

Diretor Adjunto de Eventos, Comunicação e Marketing
Caio Vidal

Gerente de Comunicação e Marketing
Gabriella Cavalcanti

Coordenador Editorial da CEBRI-Revista
Bruno Zilli

Coordenador de Cursos
Davi Bonela

Coordenadora de Comunicação e Marketing
Isabelle Rodrigues

Coordenadora de Eventos
Julia Cordeiro

Analista de Comunicação e Marketing
Beatriz Andrade

Analista de Eventos
Lucas Buzinaro

Analista de Comunicação e Marketing
Lucas Machado

Analista de Eventos
Vitória de Faria Ribeiro

Analista de Comunicação e Marketing
Laura Motta

Assistente de Eventos
Maria Eduarda Cerca

Trainee de Comunicação e Marketing
Alice Nascimento

Assistente Editorial
Victoria Corrêa do Iago

Estagiária de Eventos
Giulia Novais

Consultora de Comunicação Institucional
Lydia Medeiros

Relações Institucionais e Governamentais

Conselho Consultivo -
Relações Institucionais e Governamentais
Antonio Souza e Silva

Assessor Executivo
Gustavo Heluane

Administrativo, Financeiro e Eventos Institucionais

Diretora de operações, RH e Financeiro
Flavia Theophilo

Diretora Adjunta Administrativa Financeira
Juliana Halas

Diretora Adjunta Financeira
Fernanda Sancier

Gerente de Relações Institucionais
Nana Villa Verde

Coordenador de TI
Eduardo Pich

Coordenador Financeiro
Gustavo Leal

Coordenadora Administrativa e RH
Marcele Reis

Analista de Relações Institucionais
Mariana Carluccio

Analista Financeiro
Miguel Junior

Secretária Executiva
Patricia Burlamaqui

Técnico de Audiovisual e Suporte de TI
Vagner Oliveira

Estagiário de TI
João Paulo de Carvalho Pereira

Auxiliar de Serviços Gerais
Vânia Souza

Auxiliar de Serviços Gerais
Joilson Ribeiro

CEBRI

Rethink Tank

Centro Brasileiro de Relações Internacionais

Rua Marquês de São Vicente, 336
Gávea, Rio de Janeiro - RJ - Brasil
22451-044

Tel: +55 (21) 2206-4400
cebri@cebri.org.br

[@cebrionline](#)

cebri.org