



Alternativas de descarbonização para o setor de transporte marítimo no Brasil



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 congregar 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.

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

Coordenador



Rafaela Guedes

Senior Fellow



Gregório Araujo

Pesquisador Sênior



Guilherme Dantas

Pesquisador Sênior



Yuri Telles

Dados e Visão Integrada

FICHA TÉCNICA

Autores

Huang Ken Wei

Rafaela Guedes

Guilherme Dantas



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

Introdução	06
Caracterização do Segmento Marítimo no Brasil	08
Opções de descarbonização do setor marítimo	13
Panorama atual do setor brasileiro para a descarbonização	29
Ações para descarbonização do setor marítimo Norueguês	31
Oportunidades de colaboração entre o Brasil e Noruega	32

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]. Além de seu papel crucial no âmbito do comércio internacional de mercadorias, o transporte marítimo se destaca como um modal fundamental, caracterizado por sua grande eficiência e menor consumo de combustível em comparação a outras modalidades, quando se considera uma determinada massa e distância transportada ^[3]. No âmbito brasileiro, em 2021, as exportações brasileiras foram impulsionadas principalmente por produtos como minério de ferro, sementes, oleaginosas, combustíveis e produtos oriundos de destilação. Esses produtos representaram 45% da receita total gerada pelas exportações do país ou cerca de 76% do volume total exportado ^[4,5]. Assim como diversos outros tipos de mercadorias, o transporte marítimo desempenhou um papel preponderante no frete desses itens, sendo fundamental não apenas para a economia global, como também a economia brasileira.

Concomitantemente, o crescimento das emissões de gases de efeito estufa tem suscitado preocupação em relação ao cenário climático global. Entre 2006 e 2015, a temperatura média da superfície terrestre aumentou em 1,5°C em comparação com o período de 1850 a 1900 ^[6]. Essa crescente preocupação com os impactos causados pela atividade humana no nosso planeta, especialmente devido à emissão de substâncias poluentes, resulta na necessidade de redução das emissões em todos os setores industriais, inclusive na indústria marítima. No ano de 2018, a demanda energética global da frota de embarcações foi responsável pelo consumo de 10,6 exajoules (EJ) ^[7]. Por conseguinte, o setor marítimo foi responsável pela emissão de uma magnitude significativa de dióxido de carbono, totalizando 1,056 bilhões de toneladas, o que representa cerca de 3% das emissões totais no mundo. Para o Brasil, em 2021, o transporte marítimo representou aproximadamente 0,5% das emissões. Uma estratégia pensada como alternativa para redução das emissões foi a elaboração de normativas destinadas à padronização de parâmetros, tais como limites de velocidade, potência e consumo de combustível. No entanto, essa abordagem encontra desafios substanciais ao ser aplicada em um universo de embarcações caracterizado por uma notável heterogeneidade em termos de construção e operação. A implementação de tais padronizações, nesse contexto, poderia resultar em desvantagens para as embarcações que adotam práticas de operação mais ambientalmente responsáveis ^[8].

Neste contexto de necessidade de diminuição das emissões de gases poluentes, a Organização Marítima Internacional (IMO - International Maritime Organization) estabeleceu uma ambiciosa meta até 2050: neutralizar as emissões de gases de efeito estufa até e/ou próximo de 2050 ^[9]. Para reduzir a emissão dos principais gases de efeito estufa, como dióxido de carbono, metano e óxido nitroso ^[10], estratégias como a adoção de combustíveis com menor ou nenhuma emissão e melhorias na eficiência energética surgem como alternativas promissoras ^[11]. Logo, é compreensível o uso de combustíveis alternativos estar atraindo grande interesse da comunidade naval.

Em relação às melhorias da eficiência energética, principalmente via otimizações da operação do navio, pode-se destacar a melhoria da forma do casco, dos sistemas de propulsão ou, de forma mais geral, um aprimoramento da eficiência energética da embarcação. 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. Com isso, sistemas de monitoramento de velocidade, consumo e emissões são grandes aliados para o melhor acompanhamento e utilização das tecnologias citadas ^[14].

A comunidade técnica e científica tem trabalhado na implantação de medidas de descarbonização do transporte marítimo, e dentre os países que mais investem nessas ações, destaca-se a Noruega, que é líder mundial no desenvolvimento de ações para a adoção de tecnologias de emissão baixa ou nula de carbono ^[15].

O presente relatório tem como objetivo mapear possíveis rotas de descarbonização do setor marítimo brasileiro e seus respectivos potenciais de abatimento, além de potenciais trocas de experiências com a Noruega. O segundo capítulo do relatório abrange uma caracterização do setor de transporte marítimo do Brasil. O terceiro capítulo apresenta uma descrição das opções de descarbonização, além de um enfoque nos combustíveis alternativos. O quarto capítulo apresenta um panorama do atual estágio do setor marítimo brasileiro em relação a ações para descarbonização. O quinto capítulo apresenta o panorama de descarbonização do setor marítimo norueguês e, por fim, o sexto capítulo mostra as oportunidades de colaboração entre o Brasil e a Noruega em prol da sustentabilidade do transporte marítimo.

2. CARACTERIZAÇÃO DO SEGMENTO MARÍTIMO NO BRASIL

O setor marítimo brasileiro conta com uma frota de 2281 embarcações [4] e mais de 380 portos ou terminais [16]. A atividade portuária é de suma importância para a economia brasileira, representando aproximadamente 14% do PIB (Produto Interno Bruto) brasileiro [17]. A Figura 1 mostra a disposição das principais rotas nacionais e portos brasileiros.

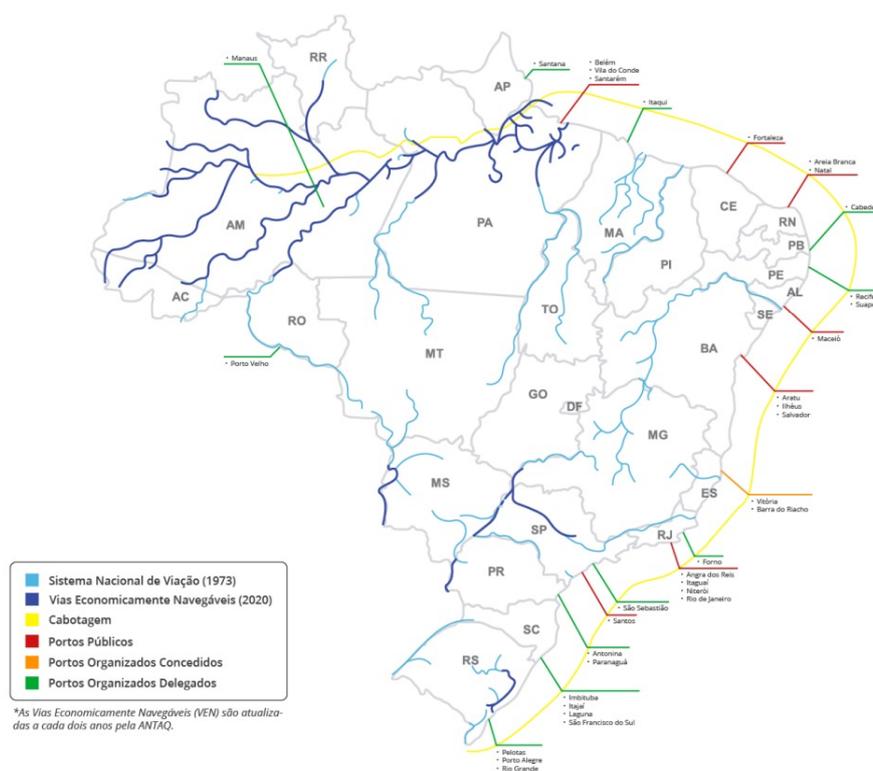


Figura 1: Principais portos e vias hidroviárias brasileiras. Fonte: ANTAQ [18].

De acordo com a ANTAQ (Agência Nacional de Transportes Aquaviários), em 2021, os portos e terminais brasileiros registraram uma movimentação de mais de 1,2 bilhões de toneladas de carga feitas em aproximadamente 400 mil atracações [4]. A rota que apresentou maior movimentação de cargas foi Ponta da Madeira, no Maranhão, até o porto de Qingdao, na China, cujo frete é focado em minério de ferro. A rota foi responsável pelo transporte de aproximadamente 130 milhões de toneladas, o que representou 18% do total da movimentação do transporte aquaviário brasileiro no ano de 2021. O perfil das cargas transportadas pode ser dividido em 4 tipos: granel sólido, granel líquido e gasoso, contêineres e carga geral. A Figura 2 mostra a movimentação por tipo de cargas entre 2011 e 2021, enquanto a Figura 3 mostra a quantidade de viagens por tipo de carga entre os anos de 2011 e 2021. Dentre os granéis sólidos, alguns exemplos são o ferro e demais minérios, carvão, grãos, bauxita e fosfato, e oleaginosas. Essas cargas a granel são

geralmente enviadas em navios especialmente projetados para o transporte destas e são carregadas diretamente no navio, sem a necessidade de serem embaladas [19]. Esse tipo de carga representou 58% do total de cargas movimentadas em portos brasileiros no ano de 2021, com o total de cerca de 707 milhões de toneladas de cargas.

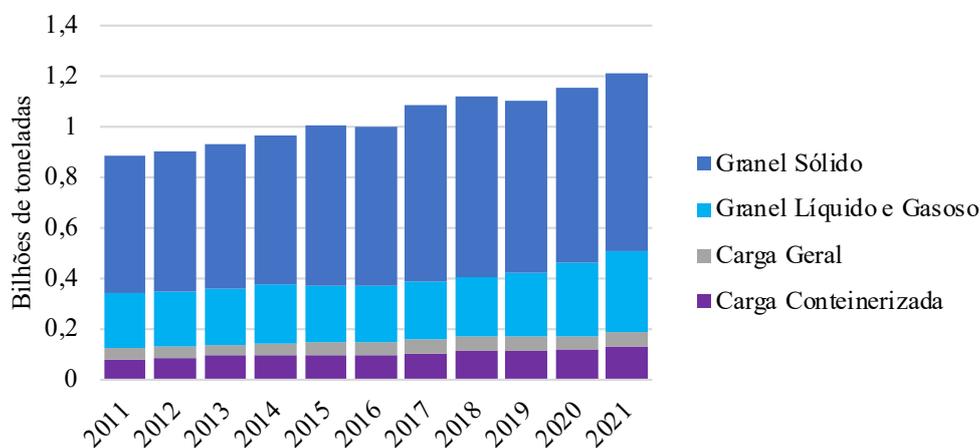


Figura 2: Movimentação total por tipo de carga em portos brasileiros entre os anos de 2011 e 2021. Fonte: adaptado de ANTAQ [4].

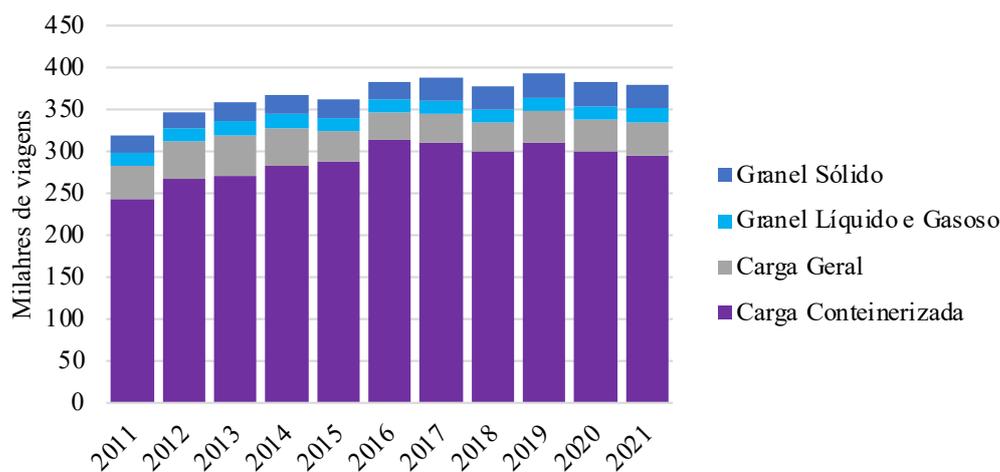


Figura 3: Quantidade de viagens com origem e/ou destino em portos brasileiros por tipo de carga transportada entre os anos de 2011 e 2021. Fonte: adaptado de ANTAQ [4].

Deste total, minério de ferro, milho e soja se destacaram, contabilizando 52%, 16% e 4% do total da movimentação, respectivamente. Em relação ao número de atracções, o transporte deste tipo de carga foi responsável por mais de 28 mil atracções em 2021, representando 7% do total de atracções em portos brasileiros. Dessas atracções, mais de 10% delas foi concentrada na rota entre o Terminal de Portochouelo, localizado em Porto Velho, no estado de Rondônia (RO), e o Terminal de Hermasa, localizado na cidade de Itacoatiara, no estado do Amazonas (AM), fazendo o transporte de milho e soja.

O granel líquido e gasoso pode ser dividido em duas categorias principais: óleos vegetais (comestíveis ou não) e óleos e gases originados do petróleo (Khan et al. 2016). Boa parte do frete deste tipo de carga é concentrado nas rotas de

campos de produção de petróleo até a costa brasileira, principalmente para os portos de Angra dos Reis e do Açú, no Rio de Janeiro (RJ), e de São Sebastião, em São Paulo. Essas rotas citadas foram responsáveis por cerca de 26% da movimentação total de granel líquido e gasoso em portos brasileiros no ano de 2021. Dentre as quase 17 mil atracções registradas com movimentação de granel líquido ou gasoso no ano de 2021, a grande maioria teve movimentação de petróleo e derivados, com destaque para as rotas do Terminal de Ilha D'Água até o Terminal da Baía de Guanabara, no Rio de Janeiro, e dos Terminais Fluviais do Brasil, em Itacoatiara (AM), até Manaus (AM). Essas duas rotas concentraram mais de 600 atracções cada, e somadas representam 8% das atracções com movimentação deste tipo de carga.

O termo carga geral abrange desde mercadorias armazenadas em sacos, caixas, engradados, tambores até grandes peças de maquinários ou veículos. A carga geral normalmente tem diferentes tamanhos e formas, e isso faz com que seja necessária atenção durante o armazenamento. O transporte deste tipo de carga apresentou uma movimentação de aproximadamente 60 milhões de toneladas de carga no ano de 2021. O frete de pastas químicas de madeira e de produtos semimanufaturados de ferro ou aço representou, respectivamente, 33% (mais de 19 milhões de toneladas) e 14% (mais de 8 milhões de toneladas) do total deste tipo de carga movimentada em portos e terminais brasileiros. A rota com maior movimentação de pastas químicas de madeira foi a de Guaíba até a cidade de Rio Grande, ambas no estado do Rio Grande do Sul, com mais de 3,1 milhões de toneladas do produto transportadas. Já em relação a produtos semimanufaturados de ferro ou aço, a rota do terminal da empresa Thyssenkrupp, na cidade do Rio de Janeiro (RJ), até a cidade de Brownsville, nos Estados Unidos, foi que apresentou maior movimentação, com cerca de 1,9 milhões de toneladas transportadas em 2021. Em relação a atracções, este tipo de carga apresentou cerca de 39 mil viagens em 2021, com a rota de Belém até Manaus sendo a mais ativa (5127 viagens).

Por fim, os contêineres são cargas unitizadas^a caracterizados por uma unidade chamada TEU (twenty-feet equivalent unit, que equivale a 6,1 metros de distância). A movimentação de contêineres em portos brasileiros foi de mais de 133 milhões de toneladas em 2021, com pouca concentração de carga em uma rota específica. A rota que mais apresentou movimentação foi de Vitória, no estado do Espírito Santo (ES), até Santos, em São Paulo, com aproximadamente 2,2 milhões de toneladas, o que equivale a aproximadamente 1,7% do total de contêineres movimentados no ano. Em relação ao número de atracções, a movimentação de contêineres dominou o transporte marítimo, com mais de 295 mil viagens no ano de 2021, o que equivale a 78% do total de viagens. Dentre as principais rotas, é possível destacar Santos até Pecém, no estado do Ceará, com 1957 atracções, Suape, na Bahia, até Santos, com 1649 atracções, e Pecém até Santos, com 1541 atracções.

Em relação aos tipos de navegação, os 5 tipos são: apoio marítimo, apoio portuário, cabotagem, navegação de interior e navegação de longo curso. 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 2021. A navegação de apoio, tanto marítimo quanto portuário, representou uma quantidade mínima de carga movimentada e de atracções para os anos analisados. Por outro lado, a navegação de interior, cabotagem e longo curso representaram em 2021, 5%, 24% e 70% da movimentação de carga total, e 15%, 20% e 64% das viagens totais de portos e terminais brasileiros, respectivamente.

^aA unitização de cargas é o processo de reorganização e agrupamento de produtos e é empregada para auxiliar no processo de movimentação de carga, reduzindo o trabalho no manuseio. O objetivo de ter cargas unitizadas é formar cargas unitárias que, apoiadas em uma base, que geralmente é um palete, permite que o equipamento de manuseio mecânico levante e transporte a carga com mais eficiência.

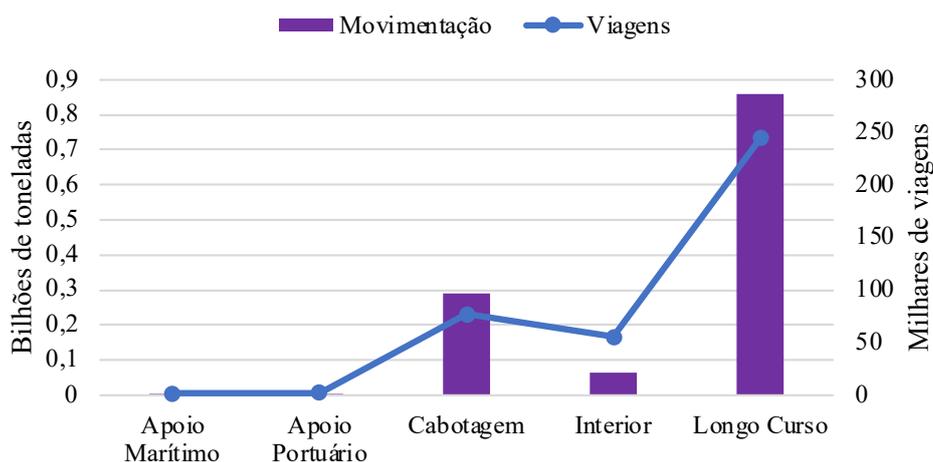


Figura 4: Movimentação de carga, em bilhões de toneladas, e quantidade de viagens feitas com origem e/ou destino a portos brasileiros em 2021 por tipo de navegação. Fonte: adaptado de ANTAQ [4].

A navegação de longo curso é realizada entre portos brasileiros e estrangeiros[17]. Grande parte da movimentação de cargas da navegação de longo curso tem como destino o porto de Qingdao, saindo dos portos de Ponta da Madeira (MA), Ilha da Guaíba (RJ), Itaguaí (RJ), Tubarão (ES) e Angra dos Reis (RJ), que em 2021 foram responsáveis pelo transporte de mais de 193 milhões de toneladas, em grande parte de minério de ferro, representando 23% das cargas de longo curso e 15% da movimentação total proveniente de portos e terminais brasileiros. Já em relação à quantidade de viagens, o transporte de contêineres oriundo de Shanghai, na China, até Santos (SP), é a rota mais movimentada, com 1423 viagens em 2021. O contraste entre as rotas com maior volume de carga e de viagens se dá no valor agregado dos produtos: o minério de ferro, de menor valor agregado, é carregado em maior volume e menos viagens, com carga média de aproximadamente 27 mil toneladas por viagem, ao passo que contêineres tem grande valor agregado e por conta disso são transportados em menor volume e mais viagens, de forma a apresentar um frete mais ágil, com carga média por viagem de 364 toneladas. Além do minério de ferro, a soja e petróleo e derivados também são cargas com grande movimentação para este tipo de navegação, e juntos os 3 tipos de produtos representam mais de 60% da carga de longo curso transportada entre 2011 e 2021.

A cabotagem é feita entre portos ou pontos do território brasileiro, utilizando a via marítima ou as vias interiores [17]. Esse tipo de navegação apresenta algumas rotas de intenso movimento, como Santos, no estado do São Paulo, a Pecém, no estado do Ceará, concentrada no transporte de contêineres. Apesar disso, esse tipo de frete representa aproximadamente um terço da carga transportada e de viagens se comparado à navegação de longo curso.

Já a navegação de interior, que é feita em hidrovias interiores, podendo ser em percurso nacional ou internacional [17], tem como rota mais intensa o trecho entre Belém e Manaus, com maquinários e veículos sendo a carga mais transportada. Pode-se destacar também a rota entre Porto Velho e Itaituba (PA), com um grande volume de movimentação de milho e soja.

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 2009 e 2021.

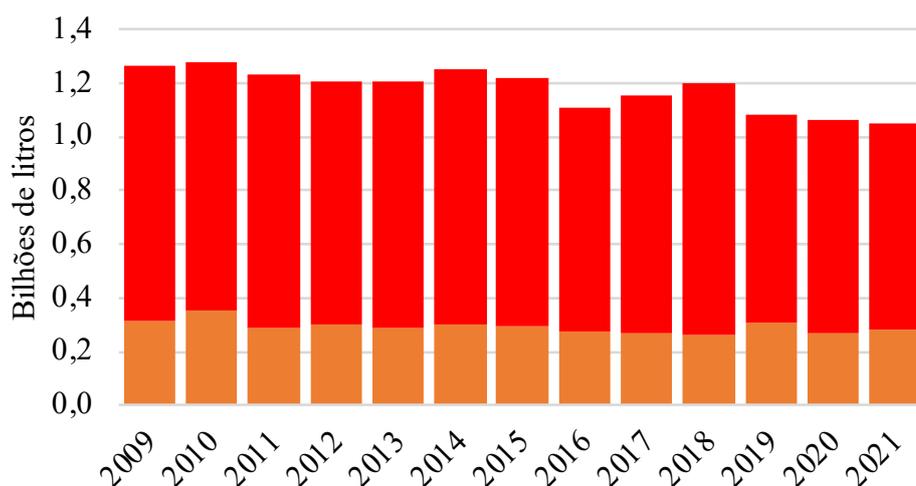


Figura 5: Consumo energético do transporte marítimo no Brasil entre os anos de 2009 e 2021. Fonte: EPE [20].

É constatado que durante os anos analisado, a média do consumo foi de aproximadamente 1,2 bilhões de litros por ano, e que há uma tendência de queda na demanda energética de aproximadamente 1,5% ao ano. Em 2021, ano mais recente dos dados da EPE, foram consumidos 762 milhões de litros de óleo combustível e 285 milhões de litros de diesel, totalizando 1,047 bilhão de litros. Esse consumo foi responsável pela emissão direta de 2,4 milhões de toneladas equivalentes de dióxido de carbono (CO₂eq) para o óleo combustível e 0,8 milhões de toneladas de CO₂eq para o diesel consumido, o que resulta em uma emissão do transporte marítimo de 3,2 milhões de toneladas de CO₂eq. É importante ressaltar que navios que utilizam o óleo combustível são em sua maioria de grande porte e com rotas de maior distância, utilizando motores de 2 tempos, motores que compõem 72% dos navios da frota mundial. Já embarcações de porte menor, como navios de apoio marítimo e rebocadores, optam por motores de 4 tempos, que estão presentes em 26% da frota mundial, segundo dados da IMO referentes ao ano de 2018 [7].

A demanda energética das embarcações em águas brasileiras correspondeu, em 2021, a 1,3% da demanda total do setor de transportes e 0,7% da demanda energética geral do país [20], corroborando com a afirmação de que o transporte aquaviário é um modal eficiente em termos de carga ou passageiros transportados por energia. Apesar disso, deve-se ressaltar a baixa participação de embarcações no transporte de cargas e passageiros se comparado ao setor rodoviário frente ao potencial que este setor tem para otimizar o consumo energético dos transportes brasileiros. Considerando as emissões do setor, o transporte aquaviário representou 1,8% das emissões do setor de transportes e apenas 0,2% das emissões totais do Brasil em 2021. Contudo, a comunidade naval brasileira necessita buscar formas de reduzir as emissões do setor, considerado de difícil descarbonização devido às dificuldades de substituição dos combustíveis atualmente utilizados, por conta das metas estipuladas pela IMO.

3. OPÇÕES DE DESCARBONIZAÇÃO DO SETOR MARÍTIMO

Esse capítulo é dividido em quatro 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, maturidade tecnológica e viabilidade de inserção na frota. Por fim, a quarta parte lida com o potencial de redução de emissões dos combustíveis alternativos.



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 ^[2].

Os atores que estão ligados ao setor naval foram divididos em quatro 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 Figura 6 mostra um esquema com as principais ações idealizadas por agente.

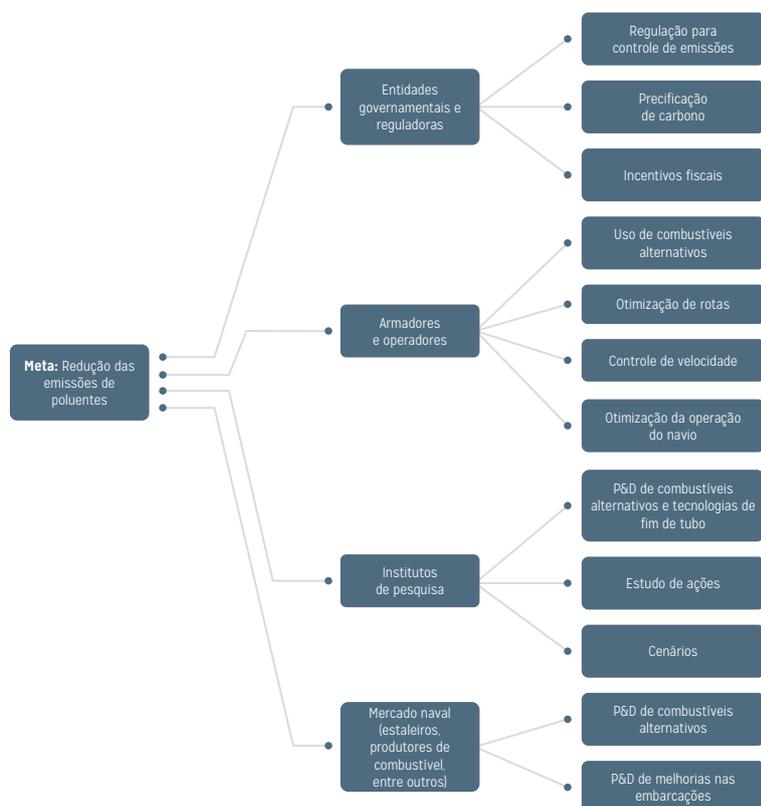


Figura 6: Medidas potenciais que cada conjunto de atores pode tomar para a redução de emissões de poluentes no setor naval.

As medidas são apresentadas conforme o grupo de agentes já descrito na Figura 6, que vão ser 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 [22].

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 [21]. 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 [21].

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 ^[23]. 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 ^[24].

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 ^[25].

3.1.2.1. USO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

Para atender às novas metas de descarbonização e dessulfurização impostas pela IMO, o uso em larga escala de combustíveis neutros em carbono 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 ^[26]. 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 ^[21].

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 [27].

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 (Serra and Fancello 2020). 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% [14].

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 [24,29,30], 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 [31,32].

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 [21,22,24,33] 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 ^[34]. Alguns estudos ^[11,35] 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. Instituições governamentais como a IMO ^[7] e algumas empresas ligadas ao setor naval como a DNV ^[56] 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 ^[37], BP, Repsol, Galp, Total, Cespa, Honeywell BTG-BTL, TechnipFMC, Fortum e Valmet ^[38], além de outras empresas já estarem com pretensão de começar a produção, como a Petrobras ^[39].

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 ^[40]. 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 ^[21]. 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 ^[41].

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 [42]. 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 7, 8 e 9 mostram as rotas de produção de diversos combustíveis alternativos, que podem ser divididas em três grupos, conforme apresentado no estudo de Carvalho et al [43]. O primeiro grupo abrange combustíveis destilados, que podem ser aplicados em motores de ignição atuais com pequenas alterações. Já o segundo grupo é composto por álcoois e gases liquefeitos, que também podem ser utilizados em motores de ignição atuais caso alterações sejam feitas. Por fim, o terceiro grupo tem o hidrogênio, amônia e os eletrocombustíveis, que são combustíveis sintéticos feitos a partir de hidrogênio.

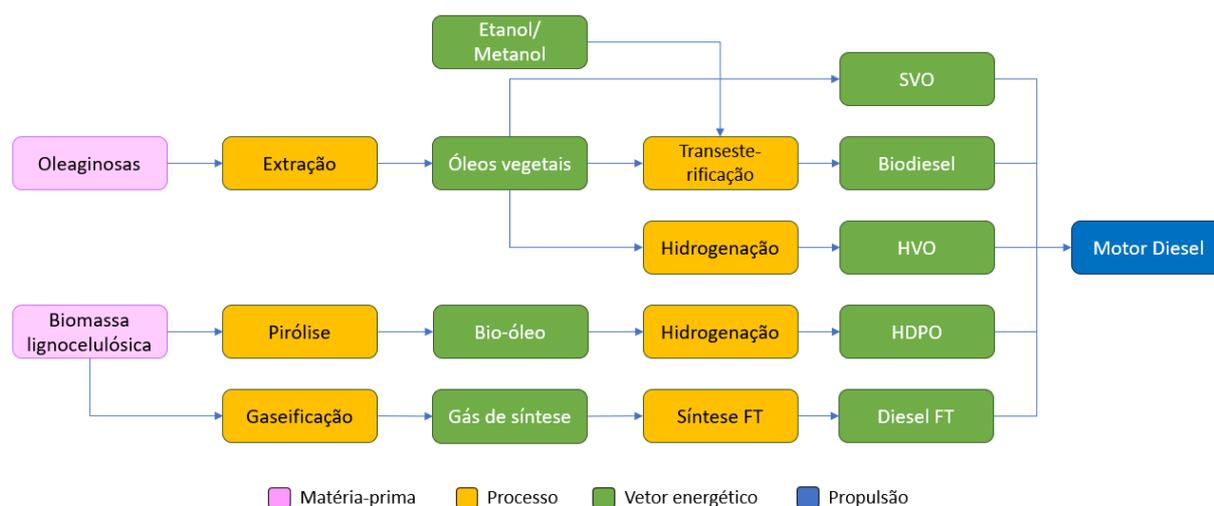


Figura 7: Combustíveis alternativos potencialmente neutros em carbono para o setor marítimo: destilados. Fonte: Carvalho et al [43].

Os biocombustíveis líquidos destilados se enquadram na categoria de combustíveis drop-in* (ou quase drop-in), 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.

*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.

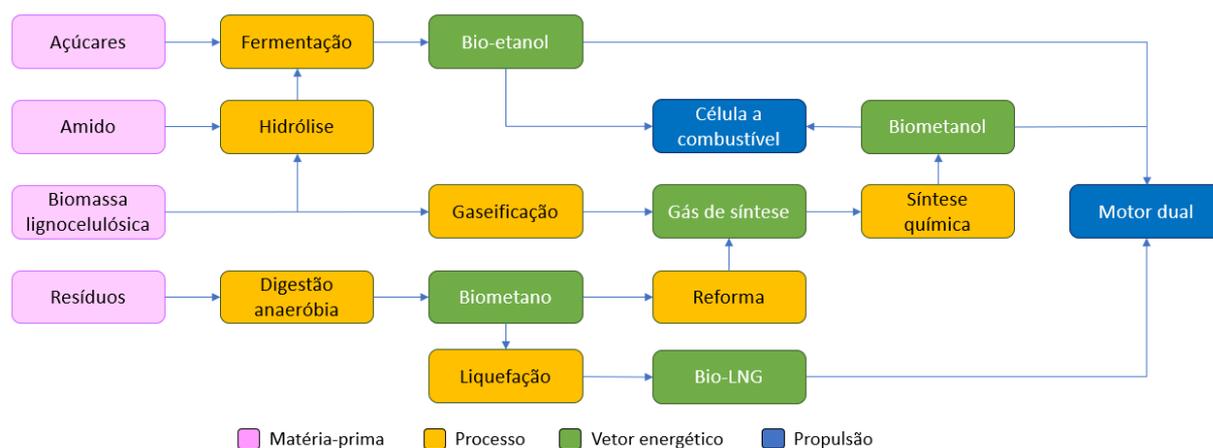


Figura 8: Combustíveis alternativos potencialmente neutros em carbono para o setor marítimo: álcoois e gases liquefeitos.
Fonte: Carvalho et al [43].

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 piloto para iniciar a ignição e o combustível principal para completar a combustão, na frota marítima. Combustíveis deste grupo são o biometano liquefeito (Bio-LNG), bem como o metanol e o etanol derivados de biomassa (biometanol e bioetanol, respectivamente).

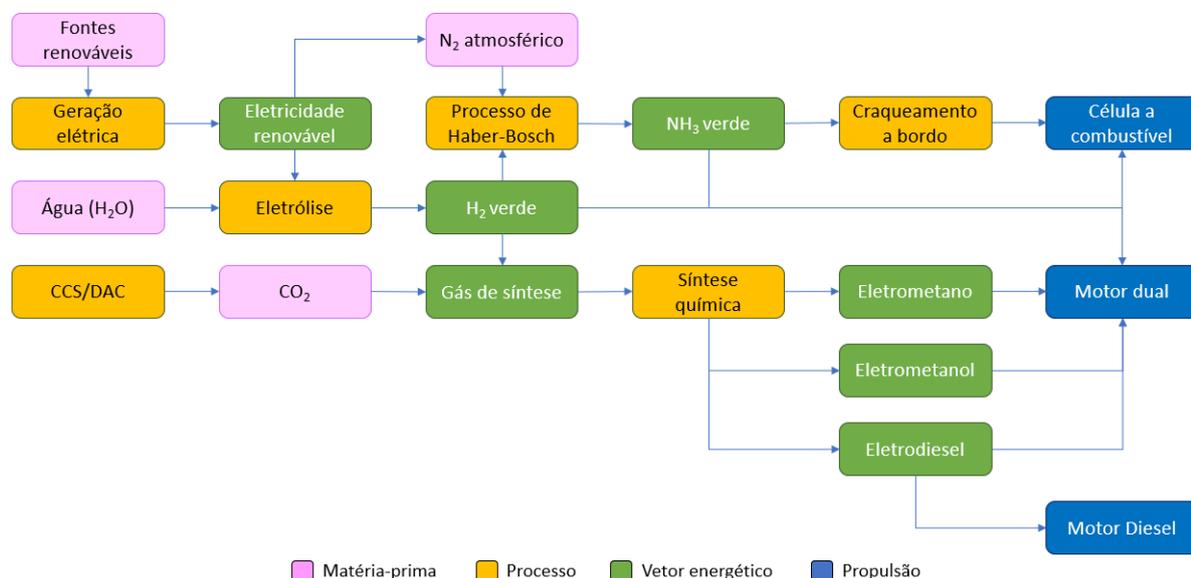


Figura 9: Combustíveis alternativos potencialmente neutros em carbono para o setor marítimo: hidrogênio, amônia e eletrocombustíveis.
Fonte: Carvalho et al [43].

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.

3.3. VIABILIDADE DE USO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

Esta seção é composta por uma discussão a respeito das principais opções de combustíveis alternativos para embarcações. Inicialmente, as características gerais são apresentadas, seguido pela discussão de maturidade tecnológica e viabilidade de aplicação. Por fim, o potencial de redução de emissões na aplicação dos combustíveis é apresentado.

3.3.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS

A Figura 10 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.

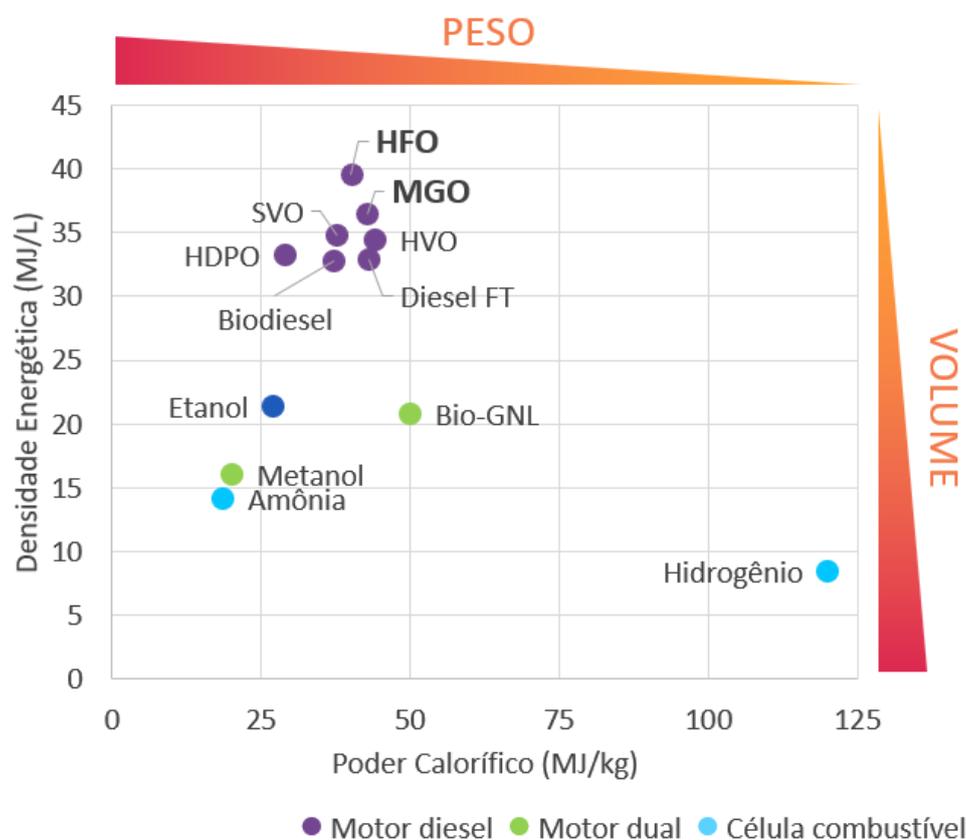


Figura 10: Comparação de densidade energética e poder calorífico entre os combustíveis tradicionais e alternativos. Fonte: adaptado de DNV GL [42].

O bio-GNL surge como a alternativa para reduzir as emissões de óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio e partículas [44]. Em condições de temperatura e pressão atmosférica, o bio-GNL 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 [45].

O bioetanol 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 [46]. 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 [47].

As características dos biocombustíveis podem variar de acordo com a matéria-prima empregada na produção. Biodiesel, SVO, HVO, HDPO 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 [48]. 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 [49]. O biodiesel, frequentemente considerado um dos biocombustíveis mais promissores, é frequentemente apontado como um possível substituto do diesel no setor de transporte rodoviário [33].

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 [50]. Sendo um composto parafínico, o HVO apresenta um alto número de cetano, geralmente variando de 75 a 95 [51]. 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 [52]. 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 [53]. O HPO possui uma viscosidade notavelmente alta e instável, apresentando desafios tanto para seu uso como combustível quanto para seu armazenamento [54].

O baixo ponto de fulgor do biodiesel restringe sua aplicação prática em condições de baixa temperatura do ar [55]. Por outro lado, o HVO apresenta um ponto de fulgor mais alto do que os combustíveis tradicionais [51]. 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 [56].

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 [48]. 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 [54].

O metanol [57] e amônia [58] 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) [59]. Além disso, o armazenamento de hidrogênio líquido requer temperaturas extremamente baixas, especificamente -253°C [60]. 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 [61], 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 [62], juntamente com um teor de hidrogênio 50% maior em volume [63], resultando em requisitos reduzidos de volume de armazenamento de combustível. O metanol, que é líquido em condições atmosféricas [64], 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 [62]. 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 [49]. 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 [65]. 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 [58]. Por fim, o bioetanol é caracterizado pelo baixo número de cetana, que pode gerar combustões com muito atraso na ignição [66], 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.

3.3.2. MATURIDADE TECNOLÓGICA E VIABILIDADE

Em relação à maturidade tecnológica, combustíveis com cadeia produtiva já estabelecida tendem a ter maior maturidade tecnológica para o uso em embarcações. A Figura 11 apresenta o atual estágio de maturidade tecnológica dos combustíveis conforme a aplicabilidade geral no setor marítimo brasileiro.



Figura 11: Atual estágio de maturidade tecnológica dos combustíveis alternativos.

A implementação do GNL como combustível primário para navios está se tornando rapidamente uma realidade. Até julho de 2023, uma parte substancial da frota global, especificamente 403 navios, já adotou o uso do GNL como combustível, e 275 terminais em todo o mundo possuem instalações de abastecimento para essas embarcações [67]. 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 [68]. Com relação à produção do bio-GNL, apesar do grande potencial no Brasil, a produção ainda é incipiente. Portanto, apesar do crescimento do uso de gás natural liquefeito em embarcações, pelo lado da oferta ainda é necessário um maior desenvolvimento, e, portanto, o bio-GNL foi avaliado como combustível com estágio de maturação tecnológica intermediário.

Apesar de a produção de etanol já ser uma realidade e o Brasil ser um dos maiores produtores do biocombustível [69], seu uso em embarcações ainda carece de pesquisa e desenvolvimento, assim, projeta-se a possibilidade de seu uso, principalmente em pilhas a combustível, no longo prazo. Assim, a maturidade tecnológica deste combustível para o setor marítimo é baixa.

Dentre todos os combustíveis analisados, apenas o biodiesel foi mencionado em normas até 2022, permitindo seu uso em misturas de combustível marítimo. Especificamente, a ISO 8217:2017 permite a utilização de até 7% v/v de biocombustível em tal mistura [70]. O uso direto de biocombustível em navios pode comprometer os sistemas de fornecimento de energia atuais, diminuir a eficiência e, conseqüentemente, aumentar o consumo específico. No entanto, certos fabricantes de motores, como MAN, Wärtsilä e Caterpillar, realizaram testes mostrando desempenho satisfatório sem necessidade de modificações se a mistura contiver até 30% v/v de biocombustível [55]. Além disso,

misturas contendo 30% de biocombustível (B30) e diesel não resultam em alterações nos motores, embora haja um aumento no consumo específico. Inúmeros fabricantes de motores marítimos realizaram pesquisas e testes para aprimorar a implementação de biocombustíveis em embarcações [71]. Apesar desse progresso, o processo de abastecimento de biocombustível em navios ainda requer desenvolvimento adicional, embora pequenos ajustes possam ser necessários [72]. Consequentemente, como combustível marítimo, o biocombustível ainda está na fase de testes, aguardando validação em condições de operação reais, porém tem sua produção já sacramentada no Brasil, apresentando estágio de maturação tecnológica próximo ao uso comercial.

Embora o SVO e o HFO compartilhem algumas semelhanças, 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 [49]. 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 [73]. 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 [74]. A implementação do SVO como combustível marítimo demanda o desenvolvimento de infraestrutura de abastecimento, bem como testes e aperfeiçoamentos adicionais, levando a um estágio de maturidade tecnológica mediano.

O HVO apresenta potencial para servir como um substituto viável para o diesel marítimo, devido a suas características similares e compatibilidade com motores de ignição convencionais [75]. Atualmente, o HVO está passando por testes no setor de transporte. Notavelmente, numerosos experimentos foram realizados envolvendo caminhões e carros utilizando o HVO tanto como combustível direto quanto como componente em misturas de combustível. Esses testes foram realizados em diversos países, incluindo Alemanha, Canadá, Estados Unidos, Finlândia e Suécia. Um teste particularmente significativo ocorreu na cidade de Alberta, Canadá, demonstrando a capacidade do HVO de funcionar eficientemente mesmo em temperaturas extremamente baixas, chegando a -44°C. No entanto, apesar das investigações no transporte rodoviário, não havia registro documentado de testes do HVO em navios até o ano de 2022 [37]. Existem certas barreiras para a adoção generalizada do HVO no setor marítimo, como capacidade de produção limitada e preços elevados, juntamente com a concorrência do setor rodoviário e aéreo [13]. Para superar esses desafios e estabelecer o HVO como um combustível marítimo viável, estudos e pesquisas abrangentes adicionais são essenciais, portanto o combustível apresenta maturidade tecnológica média.

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 [76]. No entanto, sua adoção generalizada requer mais pesquisa e testes abrangentes [67]. Devido ao estágio inicial de desenvolvimento, o HDPO foi classificado como tendo um nível de maturidade baixo.

Embora os componentes individuais do processo de Fischer-Tropsch sejam bem conhecidos e tenham sido demonstrados em escalas industrial, a integração do processo e demonstração da operação ainda estão longes de

alcançar o estágio comercial ^[77]. Até o momento, o processo Fischer-Tropsch foi demonstrado em plantas piloto e plantas em grandes escalas ainda não entraram em operação. Recentemente, vários projetos de demonstração em escala industrial foram cancelados na Europa ^[78]. Todavia, diversas iniciativas ainda estão em andamento. Diante deste contexto, o FT-diesel foi pontuado com desempenho mediano no critério de maturidade tecnológica.

Em relação ao metanol, em julho de 2023, combustível já era utilizado em 25 navios em todo o mundo, e 127 terminais estavam abastecendo navios com metanol ^[67]. Como mencionado anteriormente, as tecnologias e procedimentos para usar o metanol como combustível marítimo e para aplicações de abastecimento foram estabelecidos e regulamentados pela IMO e sociedades de classificação. De acordo com o relatório da ABS ^[79], motores a metanol que utilizam processos de combustão de diesel de alta pressão foram disponibilizados pelos fabricantes MAN e Wärtsilä. Devido a esses fatores favoráveis e ao potencial de integração rápida na frota marítima, o metanol foi estimado como tendo um alto potencial para uso generalizado a curto prazo. Como resultado, o nível de prontidão tecnológica atribuído ao metanol é alto, apesar da necessidade de maior desenvolvimento da produção de metanol a partir de fontes de biomassa.

A amônia atualmente se beneficia de uma rede estabelecida de cadeia de suprimentos principalmente voltada para seu uso na indústria química ^[62], com transporte eficiente por navios em todo o mundo. O motor de duplo combustível MAN, originalmente projetado para operar com metanol e diesel, também pode ser adaptado para usar amônia como combustível alternativo, desde que certas modificações sejam feitas no sistema de alimentação de combustível sob pressão^[80]. Como resultado, as tecnologias, materiais e procedimentos necessários para sua aplicação são bem conhecidos dentro da indústria. No entanto, são necessários mais adaptações e desenvolvimento para utilizar a amônia como combustível marítimo ^[81]. O uso do combustível enfrentaria concorrência do setor químico e enfrentaria desafios como alta toxicidade e o estágio prematuro da tecnologia para integração em motores e células de combustível. Consequentemente, para que a amônia alcance plena viabilidade comercial a longo prazo, são necessários avanços tecnológicos adicionais, resultando em um estágio de maturidade tecnológica mediano.

Similar à amônia em aspectos práticos de infraestrutura naval, a produção de hidrogênio via rotas sustentáveis ainda é incipiente, além do custo ser alto ^[61] e a utilização com o sistema de propulsão mais eficiente (pilhas a combustível) ainda estar em fase de desenvolvimento. Assim, a difusão do uso deste combustível é estimada para longo prazo e seu estágio de maturidade tecnológica é considerado baixo.

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. Considerando o território brasileiro, é possível classificar as rotas conforme as distâncias. Rotas de até 100 quilômetros, como as de travessia dos rios, entre cidades próximas e entre locais próximos podem ser consideradas de curta distância. Já trajetos de até 1000 quilômetros, ligando locais intermunicipais ou até interestaduais, são consideradas rotas de distâncias médias. Já no transporte a distâncias superiores a 1000 quilômetros são considerados de longa distância. A respeito das características das embarcações, a classificação pode ser feita quanto ao porte.

Embarcações de pequeno porte são aquelas que transportam até 10 toneladas; aqui se enquadram 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. Por fim, são considerados navios de grande porte aqueles que transportam mais de 500 toneladas. Nesta faixa de porte, estão situadas a maioria das embarcações que fazem o frete de cargas. Por fim, o horizonte temporal é definido a partir da classificação já citada anteriormente: curto prazo (até 2030), médio prazo (entre 2030 e 2040) e longo prazo (entre 2040 e 2050). A Figura 12 mostra a síntese da análise conforme as 3 variáveis citadas.

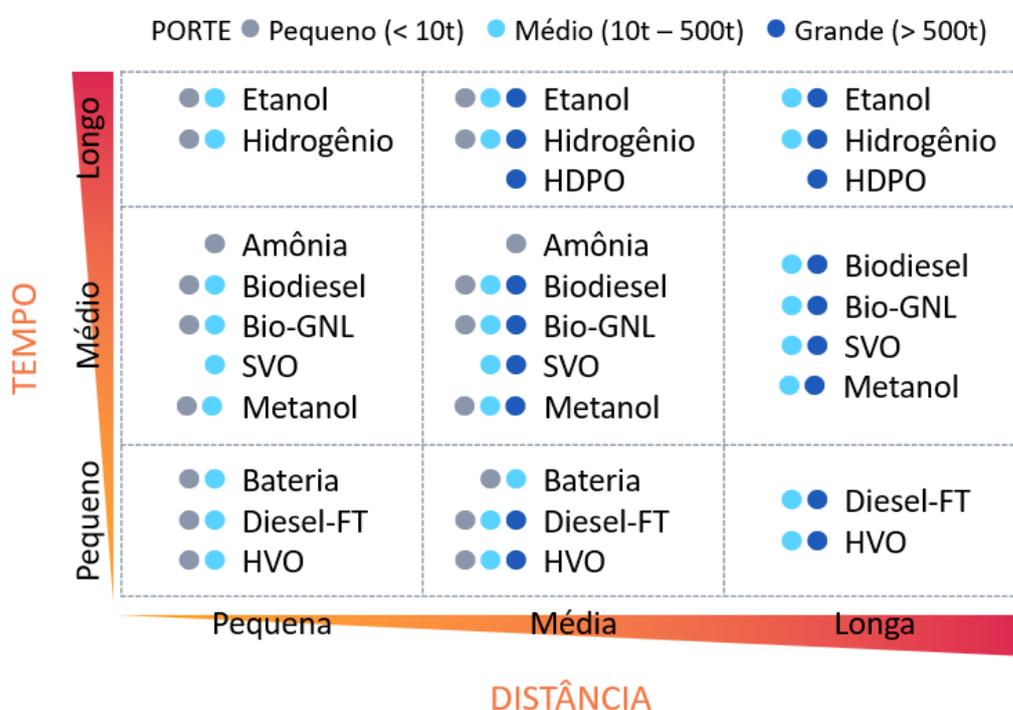


Figura 12: Análise da viabilidade de combustíveis e tecnologias alternativas para o setor marítimo.

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. No curto prazo, a viabilidade do uso de baterias carregadas por eletricidade para trajetos mais curtos é considerada, especialmente se um sistema híbrido for empregado. Já é possível observar o emprego de sistemas de armazenamento de energia (Energy Storage System, ESS) em navios [62], com 324 embarcações fazendo uso total ou parcial de baterias como fonte de energia em 2023 [67]. 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.

No médio prazo, à medida que sistemas de conversão em propulsão compatíveis com biodiesel, metanol de biomassa e bio-GNL se tornam mais difundidos e esses combustíveis são produzidos em maior escala, eles também se tornam opções viáveis para embarcações de médio porte. No longo prazo, há expectativas de massificação da tecnologia de pilha a combustível e redução nos preços de combustíveis como hidrogênio, amônia e etanol, o que poderia tornar essas opções adequadas para uso em embarcações pequenas entre os anos de 2040 e 2050. Além disso, apesar de sua maturidade tecnológica limitada, o uso do HDPO também é cogitado para o longo prazo, tanto para embarcações de médio como de grande porte.

No caso das embarcações de médio porte, a avaliação para travessias de curta e média distância segue padrões semelhantes 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 biodiesel, SVO e bio-GNL para o médio prazo, e metanol, hidrogênio, amônia e etanol como alternativas de longo prazo, possivelmente com o emprego de pilha a combustível.

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. No médio e longo prazo, as opções de combustíveis são semelhantes às das embarcações de médio porte, incluindo biodiesel, SVO, bio-GNL, metanol, hidrogênio, amônia e etanol, com possíveis aplicações de pilha a combustível para o longo prazo.

3.4. REDUÇÃO NA EMISSÃO DE POLUENTES

Em relação às emissões de poluentes, as emissões líquidas, ou seja, a emissão total considerando desde a produção até o uso final do combustível, dependem diretamente do processo produtivo. A Figura 13 mostra os índices de emissão para o ciclo de vida completo dos combustíveis quando utilizados em navios.

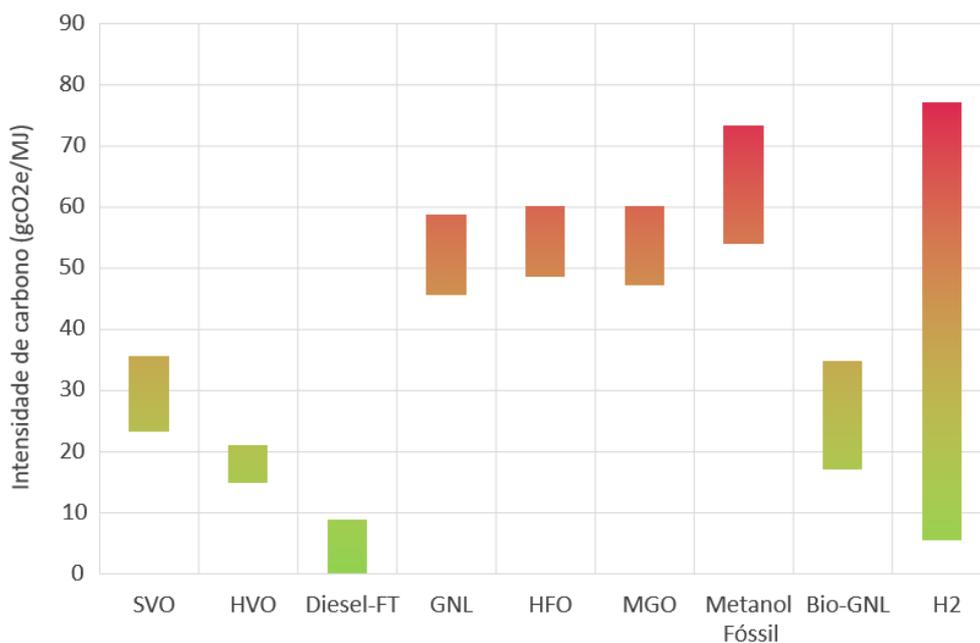


Figura 13: Emissões para o ciclo de vida completo dos combustíveis marítimos.
Fonte: adaptado de Schaeffer et al [83], Balcombe et al [24] e Brynolf [29].

Na fase de combustão, os biocombustíveis apresentam combustão neutra de carbono, ou seja, durante a combustão a quantidade de CO₂ emitida é similar a captura de carbono durante o crescimento da biomassa. Na Figura 13, a intensidade de carbono do SVO, HVO e diesel FT são de rotas brasileiras cuja matéria prima idealizada foi a biomassa [83]. Em relação à amônia e hidrogênio, por conta desses combustíveis não terem o átomo de carbono em sua composição, as emissões de CO₂ durante a combustão são nulas. Dessa forma, a intensidade de carbono desses combustíveis é praticamente toda relacionada a produção destes combustíveis [84]. Conforme a figura acima mostra, o hidrogênio apresenta uma faixa grande de intensidade de carbono, justificada pelas diferentes formas de produção, que podem ser de origem fóssil, mais emissivas, ou sustentáveis, de emissão reduzida. Conforme esperado, os combustíveis de origem fóssil apresentam índices de emissão superiores aos de origem de biomassa, o que corrobora para a adoção de combustíveis sustentáveis no setor marítimo.

4. PANORAMA ATUAL DO SETOR BRASILEIRO PARA A DESCARBONIZAÇÃO

Dado o contexto das opções de descarbonização apresentado no capítulo anterior, é constatado que a transição energética do setor marítimo pode não ser pautada apenas na utilização de um combustível alternativo, mas sim em um conjunto de combustíveis conforme a categoria do navio, a disponibilidade de infraestrutura marítima e a produção local. Também é importante ressaltar que o tema de transição energética para embarcações no Brasil, embora esteja sendo cada vez mais discutido, necessita de maior amadurecimento e difusão para impulsionar a mudança.

Um movimento importante a ser destacado é datado em 2021, quando 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. Dentre as pautas discutidas, destacam-se a identificação de combustíveis marítimos alternativos, rotas tecnológicas promissoras, potencial de produção de combustíveis alternativos, viabilidade de produção e distribuição dos combustíveis e ações para auxiliar o incentivo ao uso dos combustíveis ^[85].

Em relação ao uso em si de combustíveis sustentáveis, a empresa Bunker One, em parceria com a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), fez testes operando uma embarcação movida com um combustível composto por HFO e 7% do volume da mistura com biodiesel em 2022 ^[86]. Os testes foram feitos em navios rebocadores do porto do Rio de Janeiro, com o objetivo de verificar a performance da mistura em condições reais.

A Petrobras também realizou testes com uma mistura de 90% de HFO e 10% de biodiesel em termos de volume. Esses testes foram feitos na embarcação Darcy Ribeiro, que é um navio tanqueiro que transporta gás liquefeito de petróleo (GLP), com o objetivo principal de realizar uma análise do desempenho e identificar eventuais desafios logísticos que possam surgir. Os laboratórios de pesquisa da empresa realizaram testes e avaliações dessa mistura de combustível em janeiro de 2023, observando que seu uso não demanda modificações na infraestrutura marítima existente ^[87]. Em julho de 2023, a empresa anunciou que planeja fazer novos testes, desta vez utilizando 24% do volume da mistura de combustível com biodiesel ^[88]. Além disso, a Petrobras tem investido no estabelecimento da produção em massa de HVO em suas refinarias ^[89].

Em termos de possíveis caminhos para o início da implementação de combustíveis sustentáveis, conforme visto na caracterização, a navegação de longo curso, cabotagem e interior, que são mais intensos tanto em movimentação de cargas quanto em viagens, podem ser priorizados como o foco para o início da transição do transporte marítimo brasileiro. Como locais de grande atividade, podem ser destacados os portos de Belém, Ilha da Guaíba, Pecém, Ponta da Madeira e Santos, que por apresentarem grande movimentação, tendem a ser mais aptos em relação a investimentos para adequação da infraestrutura e produção. Os investimentos também podem ser estimulados pelas empresas para navegações e portos que lidam com os produtos mais transportados, como minério de ferro, petróleo e seus derivados e contêineres. A Amazônia Legal também pode ser um importante ponto de partida: segundo dados disponíveis no relatório da Nova Economia da Amazônia ^[90], 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 ^[91]. Destaca-se também o papel da Noruega em relação à sustentabilidade, sendo o pioneiro na adoção de medidas de descarbonização do transporte marítimo. Foi reportado que em 2021, 40% das embarcações da frota mundial que utilizam bateria operavam no país. Grande parte dessa frota eletrificada são ferries de passageiros e de veículos para rotas de curta distância, além de navios da indústria offshore ^[92].

Outro fator que prova o pioneirismo da Noruega é que, em março de 2023, o país começou a operar o primeiro navio com pilha a combustível como conversor para propulsão, sendo abastecido com hidrogênio. O MF Hydra é capaz de carregar até 300 passageiros e 80 carros, sendo equipado com duas pilhas a combustível com capacidade de 200 quilowatts cada ^[93]. Além disso, o país foi um dos primeiros a promover a taxaço de carbono, em 1991, com a meta de aumentar a taxaço em 5% até o ano de 2025 ^[15].

A grande influência do país nórdico para a sustentabilidade de embarcações pode ser vista nos planos e ações para o incentivo à produção e uso de combustíveis neutros. O país projeta uma redução de 50% das emissões em 2030, em relação ao ano de 2008. Soma-se a isso a introdução de um percentual de biocombustível obrigatório nas embarcações operando no país, com foco nos biocombustíveis avançados, feitos a partir de resíduos de biomassa ou urbanos. Uma vantagem é que a utilização de combustíveis alternativos em embarcações com bandeira norueguesa contribui para a meta estabelecida, visto que o governo Norueguês reduz os custos de eletricidade para embarcações nacionais. Por fim, há um financiamento de empresas, tanto do setor público quanto privado, para a promoção de combustíveis alternativos, como Enova, Innovation Norway e o Conselho de Pesquisa da Noruega ^[15].

6. OPORTUNIDADES DE COLABORAÇÃO ENTRE O BRASIL E NORUEGA

Conforme visto neste relatório, tanto Brasil quanto Noruega apresentam um mercado fortemente calcado no setor marítimo, em atividades que vão desde o transporte de passageiros e cargas até a exploração de petróleo offshore. Tendo em vista a grande influência do país nórdico na sustentabilidade do transporte marítimo, iniciativas para engendrar a transição energética no Brasil podem ser baseadas no conhecimento e práticas da Noruega.

O incentivo à produção e uso de combustíveis alternativos pode se dar através de medidas similares ao governo norueguês, como uma meta de redução de emissões mais arrojada e a adoção mandatória de biocombustíveis na mistura do combustível marítimo. Um ponto positivo do Brasil é o grande potencial para a produção de combustíveis e vetores energéticos sustentáveis, principalmente provenientes de biomassa, além da expertise nacional na produção de biocombustíveis ^[94], o que pode auxiliar em ações para impulsionar a produção de combustíveis neutros por parte de ambos os países.

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.

O setor privado também pode ter impacto na cooperação, não somente no uso de combustíveis alternativos, como também em medidas para melhoria da eficiência energética, que pode ser útil para redução do consumo energético. Um exemplo é a parceria entre a Vale e Kongsberg, que engloba a supervisão meticulosa dos índices de consumo de combustível das embarcações, visando otimizar a eficiência operacional ^[95].

Por fim, uma opção que vem ganhando destaque recentemente é a aplicação de corredores verdes, que consistem em rotas de comércio específica que interligam importantes redes portuárias. Essas redes portuárias devem ter a comprovação da viabilidade dos combustíveis de zero emissão estabelecida, com os intervenientes da indústria e organismos governamentais comprometidos na rota dispostos a alocar recursos em prol de estratégias de redução de carbono no âmbito do comércio marítimo nessa rota específica. Algumas das principais rotas comerciais do mundo tem sido estudadas, como as rotas de minério de ferro entre Brasil e China e a rota entre Austrália e China, além da rota de contêineres entre Austrália e Europa ^[96]. As rotas podem ser analisadas e estabelecidas entre os portos dos países ou em portos importantes para o comércio de ambos os países, como o porto de Santos, no Brasil, e o porto de Oslo, na Noruega, sendo um potencial catalisador para a mudança da matriz energética.

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;12:1-42. <https://doi.org/10.3390/su12197943>.
- [2] United Nations. Chapter 17: Shipping. 2016.
- [3] Smith TWP, Jalkanen JP, Anderson BA, Corbett JJ, Faber J, Hanayama S, et al. Third IMO Greenhouse Gas Study 2014. 2014. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0912-3>.
- [4] ANTAQ. Anuário ANTAQ 2023. <http://web.antaq.gov.br/ANUARIO/> (accessed June 24, 2021).
- [5] Ministério da Indústria CE e S. Exportação e Importação Geral 2023. <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral> (accessed May 10, 2023).
- [6] IPCC. Climate Change and Land - Technical Summary 2019.
- [7] 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/CB09781107415324.004>.
- [8] Lagouvardou S, Psarftis HN, Zis T. A literature survey on market-based measures for the decarbonization of shipping. *Sustain* 2020;12. <https://doi.org/10.3390/SU12103953>.
- [9] IMO: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/Revised-GHG-reduction-strategy-for-global-shipping-adopted.aspx#:~:text=The%20revised%20IMO%20GHG%20Strategy.points%20for%202030%20and%202040.>
- [10] IPCC. Climate Change 2014 - Synthesys Report. 2015.
- [11] 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>.
- [12] DNV GL. Maritime Forecast To 2050. *Energy Transit Outlook* 2019 2019:118.
- [13] Winnes H, Fridell E, Hansson J. Biofuels for low carbon shipping 2019.
- [14] Viktoria 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>.
- [15] Norwegian Government. The Government's action plan for green shipping. 2019.
- [16] BNDES. Portos 2021. <https://hubdeprojetos.bndes.gov.br/pt/setores/Portos#1> (accessed June 22, 2021).
- [17] Lopes da Silva G. Logística Portuária: Gestão Dos Portos Brasileiros E a Importância Da Marinha Do Brasil. *Rev Científica Sem Acadêmica* 2020;1:1-19. <https://doi.org/10.35265/2236-6717-204-9094>.
- [18] ANTAQ. Relatório de Gestão 2022. 2022.
- [19] Khan M, Sauzier J, Gray I, Kirmani R. Cargo operations: Leaners' Guide. Perth: WestOne Services 2003; 2016.
- [20] EPE. Balanço Energético Nacional (BEN) 2022: Ano base 2021 - Relatório Final. 2022.
- [21] 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. <https://doi.org/10.3390/su12083220>.
- [22] Bouman EA, Lindstad E, Rialland 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>.
- [23] 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>.
- [24] 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>.
- [25] Geerlings H, Kuipers B, Zuidwijk R. Ports and Networks: Strategies, Operations and Perspectives. First. New York: Taylor & Francis Group; 2018.
- [26] 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>.
- [27] 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>.

- [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] 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>.
- [32] 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>.
- [33] 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>.
- [34] Gallopin G, Hammond A, Raskin PD, Swart R. Branch Points: Global Scenarios and Human Choice. Stock Environ Institute ISBN 1997;91:88714.
- [35] 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>.
- [36] DNV GL. Maritime Forecast To 2050. 2020.
- [37] Neste. Neste Renewable Diesel Handbook. Espoo: 2020.
- [38] 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.
- [39] 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?clid=EAlalQobChMI_92s05vn7glViQiRCh0mKg0uEAAAYASAAEgL30vD_BwE.
- [40] 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>.
- [41] DNV GL. Part 6 Additional class notations Chapter 2 Propulsion, power generation and auxiliary systems. Rules Classif Ships 2020.
- [42] DNV GL. Comparison of Alternative Marine Fuels 2019.
- [43] 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129385>.
- [44] Whitehouse S, Poulsen J. Life Cycle GHG Emission Study on the Use of LNG as Marine Fuel. Report 2019:158.
- [45] 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>.
- [46] Ellis J, Tanneberger K. Study on the use of ethyl and methyl alcohol as alternative fuels in shipping. 2015.
- [47] 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>.
- [48] 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* 2019. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.08.006>.
- [49] Kesime 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>.
- [50] 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>.
- [51] 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.
- [52] IEA. Biofuels for the marine shipping sector. 2017.
- [53] Laursen R, Barcarolo D, Patel H, Dowling M, Penfold M, Faber J, et al. Update on potential of biofuels in shipping. Lisbon: 2022.
- [54] 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>.

- [55] 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>.
- [56] Kass M, Abdullah Z, Biddy M, Drennan C, Hawkins T, Jones S, et al. *Understanding the Opportunities of Biofuels for Marine Shipping*. 2018.
- [57] Huang Y. *Conversion of a Pilot Boat to Operation on Methanol*. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2015.
- [58] 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;12:10-4. <https://doi.org/10.3390/SU12083265>.
- [59] Lewis J. *Fuels Without Carbon: Prospects and the Pathway Forward for Zero-Carbon Hydrogen and Ammonia Fuel*. 2018.
- [60] Sheriff AM, Tall A. *Assessment of ammonia ignition as a maritime fuel, using engine experiments and chemical kinetic simulations*. World Maritime University, 2019.
- [61] ABS. *Low Carbon Shipping*. 2019.
- [62] 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. <https://doi.org/10.3390/jmse8030183>.
- [63] Earl T, Ambel CC, Hemmings B, Gilliam L, Abbasov F, Officer S. Roadmap to decarbonising European Shipping. *Transp Environ* 2018;22.
- [64] 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>.
- [65] Hansson J, Fridell E, Brynolf S. *On the potential of ammonia as fuel for shipping - A synthesis of knowledge*. 2019.
- [66] 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>.
- [67] DNV GL. *Alternative Fuels Insight 2023*. <https://afi.dnvgl.com/>.
- [68] American Bureau of Shipping. *Propulsion and auxiliary systems for gas fuelled ships*. vol. 2011. 2011.
- [69] Dincer I, Siddiqui O. *Ammonia Fuel Cells*. vol. 1. Amsterdam: Elsevier; 2020.
- [70] World Fuel Services. *ISO 8217:2017 Tables 1 & 2 Fuel Standard for marine distillate fuels and for marine residual fuels 2019:0-1*.
- [71] Ogunkunle O, Ahmed NA. Exhaust emissions and engine performance analysis of a marine diesel engine fuelled with Parinari polyandra biodiesel-diesel blends. *Energy Reports* 2020;6:2999-3007. <https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2020.10.070>.
- [72] ABS. *Biofuels as Marine Fuel*. 2021.
- [73] 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>.
- [74] 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>.
- [75] 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>.
- [76] Chong KJ, Bridgwater A V. Fast Pyrolysis Oil Fuel Blend for Marine Vessels. *Environ Prog Sustain Energy* 2014;36:677-684. <https://doi.org/10.1002/ep>.
- [77] ARUP, E4tech, Ricardo-AEA. *Advanced Biofuel Demonstration Competition Feasibility Study Annex 1 : Technology status update*. 2014.
- [78] ETIP. *FT-liquids 2019*. <https://www.etipbioenergy.eu/value-chains/products-end-use/products/ft-liquids> (accessed April 11, 2022).
- [79] ABS. *Methanol as Marine Fuel 2021:1*.
- [80] ABS. *Green Shipping Corridors: Levearing Synergies*. 2022.
- [81] Alfa Laval, Hafnia, Haldor Topsoe, Vestas, Siemens Gamesa. *Ammonfuel-an industrial view of ammonia as a marine fuel*. 2020.
- [82] Anwar S, Zia MYI, Rashid M, De Rubens GZ, Enevoldsen P. Towards ferry electrification in the maritime sector. *Energies* 2020;13:1-22. <https://doi.org/10.3390/en13246506>.
- [83] Schaeffer R, Szklo A, Portugal-Pereira J, Rochedo P, Hollanda L, Nascimento G, et al. *Prospects for Carbon-Neutral Maritime Fuel Production in*

Brazil. Rio de Janeiro: 2020.

[84] 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>.

[85] MME. Programa Combustível do Futuro 2023. <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-combustivel-do-futuro> (accessed July 5, 2023).

[86] UDOP Bunker One testará biodiesel em embarcações no Brasil em 2022 2021. <https://www.udop.com.br/noticia/2021/12/21/bunker-one-testara-biodiesel-em-embarcacoes-no-brasil-em-2022.html> (accessed March 10, 2023).

[87] Petrobras. Navio da Transpetro recebe primeiro abastecimento de bunker com conteúdo renovável 2023. <https://transpetro.com.br/transpetro-institucional/noticias/navio-da-transpetro-recebe-primeiro-abastecimento-de-bunker-com-conteudo-renovavel.htm> (accessed March 11, 2022).

[88] epbr. Petrobras testa combustível marítimo com 24% de biodiesel 2023. <https://epbr.com.br/petrobras-testa-combustivel-maritimo-com-24-de-biodiesel/> (accessed July 15, 2023).

[89] Petrobras. Vamos ampliar capacidade de produção de diesel com conteúdo renovável ainda em 2023 2023. <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/vamos-ampliar-capacidade-de-producao-de-diesel-com-conteudo-renovavel-ainda-em-2023.htm> (accessed July 20, 2023).

[90] Nobre CA, Feltran-Barbieri R, de Assis Costa F, Haddad EA, Schaeffer R, Domingues EP, et al. Nova Economia da Amazônia. *World Resour Inst* 2023. <https://doi.org/10.46830/wriipt.22.00034>.

[91] 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>.

[92] Bach H, Makitie T, Hansen T, Steen M. Energy Research & Social Science Blending new and old in sustainability transitions : Technological alignment between fossil fuels and biofuels in Norwegian coastal shipping. *Energy Res Soc Sci* 2021;74. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.101957>.

[93] Offshore Energy. WATCH: MF Hydra starts world's first voyage on emission-free liquid hydrogen 2023. <https://www.offshore-energy.biz/watch-mf-hydra-starts-worlds-first-voyage-on-emission-free-liquid-hydrogen/> (accessed May 20, 2023).

[94] Tagomori IS, Rochedo PRR, Szklo A. Techno-economic and georeferenced analysis of forestry residues-based Fischer-Tropsch diesel with carbon capture in Brazil. *Biomass and Bioenergy* 2019;123:134-48. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.02.018>.

[95] 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).

[96] Getting to Zero Coalition. The Next Wave: Green Corridors 2021:1-74.

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
André Corrêa do Lago
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

André Nassif
Antonio Lavareda
Daniela Campello
Dawisson Belém Lopes
Diego Werneck
Ernani Torres
Ernesto Mané
Feliciano de Sá Guimarães
Fernanda Cimini
Gabriel Galípolo
Gregório Cruz Araújo Maciel
Guilherme Casarões
Guilherme Dantas
Monique Sochaczewski
Patrícia Perrone Campos Mello
Simone Deos

Senior Fellows

Adriano Proença
Ana Célia Castro
Ana Paula Tostes
André Soares
Benoni Belli
Carlos Milani
Carlos Pereira
Daniela Lerda
Denise Nogueira Gregory
Diego Bonomo
Evangelina Seiler
Fabrizio Sardelli Panzini
Francisco Gaetani
Igor Rocha
José Mário Antunes
José Roberto Afonso
Larissa Wachholz
Leandro Rothmuller
Leonardo Burlamaqui
Lia Valls Pereira
Lourival Sant'anna
Mário Ripper
Matias Spektor
Miguel Correa do Lago
Monica Herz
Patrícia Campos Mello
Paulo Sergio Melo de Carvalho
Pedro da Motta Veiga
Philip Yang
Ricardo Ramos
Ricardo Sennes
Rafaela Guedes
Rogério Studart
Ronaldo Carmona
Sandra Rios
Sergio Gusmão Suchodolski
Tatiana Rosito
Vera Thorstensen
Victor do Prado

Empresas associadas

Abeeólica
Aegea
Air Products
Alterra
Arara.io
AWS
Banco Bocom BBM
BASF
Bayer
BMA Advogados
BNDES
BP
BRF
Brookfield Brasil
Casa Zalszupin
CCCC/Concremat -
Citibank
Consulado Geral dos Países Baixos no Rio de Janeiro
Consulado Geral do México no Rio de Janeiro
Consulado Geral da Noruega no Rio de Janeiro
EDP
Eletrobras
Embaixada da Austrália
Embaixada da China no Brasil
Embraer
ENEVA
ENGIE Brasil
Equinor
Etel
ExxonMobil
Furnas
Galp
Grupo Ultra
Huawei
IBÁ
IBRAM
Instituto Clima e Sociedade
Itaú Unibanco
Klabin
Lorinvest
Machado Meyer
Museu do Amanhã
Microsoft
Neoenergia
Origem
PATRI
Petrobras
Pinheiro Neto Advogados
Prefeitura do Rio de Janeiro
Promon Engenharia
Prumo Logística
Sanofi
Shell
Siemens
Siemens Energy
SPIC Brasil
State Grid
Suzano
Total E&P do Brasil
Vale
Veirano Advogados
Vinci Partners

Equipe CEBRI

Diretora-Presidente

Julia Dias Leite

Diretor de Relações Externas, Captação, Comunicação e Eventos

Lucas Dib

Diretora de Projetos

Luciana Gama Muniz

Projetos

Diretora Adjunta de Projetos

Lêa Reichert

Diretor Adjunto de Relações Externas

Pedro Francisco Vormittag

Coordenadora de Projetos

Marianna Jardim

Coordenador de Projetos

Davi Bonela

Coordenadora de Projetos

Tháís Jesinski Batista

Coordenador de Projetos

Gustavo Bezerra

Coordenadora de Projetos

Beatriz Pfeifer

Assistente de Projetos

Catarina Werlang

Assistente de Projetos

Daniel Fontes

Estagiário de Projetos

Lucca Lattanzi

Estagiário de Projetos

Felipe Cristovam

Relações Externas

Diretora Adjunta de Relações Externas

Fernanda Araripe

Gerente de Relações Institucionais

Milena Simões Murta

Assistente de Relações Externas

Mayara Nêris

Relações Institucionais

Gerente de Relações Institucionais

Nana Villa Verde

Diretor Acadêmico

Feliciano de Sá Guimarães

Diretora Administrativa Financeira

Ana Paula Marotte

Comunicação, Eventos e Projetos Especiais

Diretor Adjunto de Eventos e Comunicação

Caio Vidal

Coordenador de Comunicação e Marketing

Gustavo Gascon

Coordenador Editorial da CEBRI-Revista

Bruno Zilli

Coordenador de TI

Eduardo Pich

Coordenadora de Eventos

Isabella Ávila

Assistente de Eventos

Julia Cordeiro

Estagiária de Eventos

Giulia Novais

Assistente de Projetos Especiais

Luiz Felipe Herdy

Trainee Editorial da CEBRI-Revista

Victoria Corrêa do Lago

Estagiária de Comunicação

Alice Nascimento

Estagiária de Eventos

Sofia Mariani

Administrativa e Financeiro

Gerente Administrativa Financeira

Fernanda Sancier

Analista Financeiro

Gustavo Leal

Secretária Executiva

Patricia Burlamaqui

Auxiliar de Serviços Gerais

Vânia Souza



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