

# Desempenho ESG da Frota Mundial

## Análise Documental e de Legislação

Autor: **HAEDS Portugal**

Date: 7 de Maio de 2025

Documento	
Documento	PT-B-24042-D1-0
Data Prevista de Entrega	13 de Abril de 2025
Data Efetiva de Entrega	7 de Maio de 2025
Nível de Disseminação	Interno ao Projeto
Tarefas	1 e 2

Contribuições	
Autores Principais	HAEDES Portugal, Lda.
Contribuição de:	João Alves, Francisco Bastos, Lénia Rato

Controlo de Versões			
Versão	Data	Editor	Resumo de Alterações
0	07/05/2025	JAA/FSB/LFR	Versão Inicial – emissão de documento

## Conteúdo

<b>1</b>	<b><i>Introdução</i></b>	<b>6</b>
1.1	Identificação do Projeto	6
1.2	Objetivos do Projeto	6
1.3	Estrutura do relatório	6
<b>2</b>	<b><i>Enquadramento e panorama geopolítico</i></b>	<b>6</b>
2.1	Objetivo comum: Descarbonização	7
2.2	O Transporte marítimo internacional e a Descarbonização	9
2.3	Enquadramento Geopolítico e Estratégico para Portugal	12
<b>3</b>	<b><i>Análise De Legislação   Descarbonização Da Frota Naval (Aplicável a Embarcações Acima de 5000 Ton Arqueação Bruta)</i></b>	<b>13</b>
3.1	Legislação Internacional (IMO)	13
3.2	Legislação Europeia	16
3.3	Legislação Nacional	17
3.4	Conclusões	17
<b>4</b>	<b><i>ESG e o Desenvolvimento Sustentável</i></b>	<b>19</b>
<b>5</b>	<b><i>A Teoria Aplicada: Casos De Estudo E Boas Práticas</i></b>	<b>19</b>
5.1	Caso de estudo – Finlândia	20
5.2	Caso de estudo – Dinamarca	20
5.3	Caso de estudo – Suécia	22
5.4	Caso de estudo – Noruega	23
5.5	Caso de estudo – WATERCRAFT INDEPENDENCE	24
<b>6</b>	<b><i>Tecnologias para a Descarbonização Da Frota</i></b>	<b>25</b>
<b>6.1</b>	<b>Combustíveis alternativos</b>	<b>28</b>
6.1.1	Amónia	28
6.1.2	Biocombustíveis	31
6.1.3.	Gás natural Liquefeito	33
6.1.4.	Eletricidade	34
6.1.5.	Metanol	36
6.1.6.	Nuclear	37
6.1.7.	Hidrogénio	37
6.1.8.	Combustíveis sintéticos	38
<b>6.2</b>	<b>Reciclagem de Navios</b>	<b>43</b>
<b>6.3</b>	<b>Design</b>	<b>43</b>
<b>6.4</b>	<b>Operação e Manutenção (O&amp;M)</b>	<b>44</b>
<b>7</b>	<b><i>O Papel Estratégico Das Infraestruturas Portuárias Na Transição Energética</i></b>	<b>45</b>
<b>8</b>	<b><i>Conclusões E Perespetivas Futuras</i></b>	<b>47</b>
<b>9</b>	<b><i>Referências</i></b>	<b>49</b>

## Lista de Figuras

Figura 1. Emissões anuais de CO <sub>2</sub> da frota global de navios com número IMO, com base em dados AIS, de janeiro de 2012 a março de 2025. Fonte: S&P Global & Marine Benchmark. ....	9
Figura 2. Áreas de Emissões Controladas (ECAs) pré-existent e recentes aplicadas ao contexto Atlântico. Fonte: Comunicação Técnica e Regulatória da DNV, Abril 2025.....	10
Figura 3. Corredores Verdes internacionais em 2022. Fonte: ABS. ....	11
Figura 4. Legislação importante pela IMO para prevenir a poluição atmosférica causada por navios. Fonte: Kondratenko et al., 2025.....	14
Figura 5. FuelEU objetivos de emissões (GFI) considerando o cenário base da IMO (esquerda) e interação entre emissões e diferentes tipos de estratégias de emissões (direita). Fonte: Transport & Environment. ....	18
Figura 6. As projeções pré-2018 são baseadas nos 2º, 3º e 4º estudos da IMO sobre gases com efeito de estufa. As projeções pós-2018 usam dados da DNV (2024) e cálculos da T&E, baseados num cenário de baixo crescimento. A trajetória alinhada com 1,5 °C é baseada.....	18
Figura 7. Percentagem dos combustíveis usados no setor dos transportes na Dinamarca em 2020.....	21
Figura 8. Evolução da procura anual de transporte de mercadorias na Dinamarca de 2020 a 2045 no cenário de “política congelada”.....	21
Figura 9. O consumo de combustível no sistema de transportes dinamarquês nos cenários de Frozen Policy e Climate Response 2045 da IDA. As emissões anuais de CO <sub>2</sub> são indicadas pelo "x" amarelo no eixo Y secundário. ....	22
Figura 10. Consumo total de combustível da frota EU MRV de 2018 a 2021 e consumo por tipo de combustível entre 2018 e 2022. Fonte: EMSA, 2023.....	26
Figura 11. Procura total de energia e consumo de combustível numa trajetória rumo às zero emissões. Fonte: Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Ship, 2021. ....	27
Figura 12. Evolução das emissões anuais de CO <sub>2</sub> por tipo de navio, entre janeiro de 2012 e março de 2025. Fonte: MARINE BENCHMARK. ....	28
Figura 13. Número total de navios com baterias e projetos de construção conhecidos para 2024-2027. Fonte: The ship register — Maritime Battery Forum, 2024 .....	35
Figura 14. Previsão da distribuição de combustíveis em novos pedidos de motores dual fuel de dois tempos (2023–2034). Fonte: MAN Energy Solutions, 2025 (2025 Net Zero Maritime Conference). ....	42
Figura 15. A análise da T&E (2025) baseia-se nos preços históricos de diferentes biocombustíveis. A análise utiliza uma intensidade de 17.25 gCO <sub>2</sub> e/MJ para UCO HVO e 91.39 para VLSFO. Os preços do VLSFO representam valores históricos em Roterdão.....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tabela-resumo dos objetivos e premissas de descarbonização à escala global (baseado em informação dos websites da Comissão Europeia, Fórum Económico Mundial, Agência Internacional de Energia (IEA), Nações Unidas (UN), Governo do Canadá, e Agência Proteção do Ambiente (EPA, USA).....	7
Tabela 2. Sumário das características dos combustíveis alternativos mais promissores para o setor marítimo, compilação da informação apresentada anteriormente. ....	40

## **LISTA DE ABREVIações**

AIS - Sistema de Identificação Automática (Automatic Identification System)  
COP – Conferência das Partes (Conference of Parties)  
CPMR – Conferência das Regiões Periféricas Marítimas  
CRMN – Construção, Reparação e Manutenção Naval  
ECA – Áreas de Emissões Controladas  
EEDI – Energy Efficiency Design Index  
EEXI – Energy Efficiency Existing Ship Index  
ESG – Environmental, Social, and Governance  
GNL – Gás Natural Liquefeito  
HAZID – Hazard Identification Studies  
HAPs – Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos  
HFO – Combustível pesado  
IA – Inteligência Artificial  
IACS – International Association of Classification Societies  
ICG – International Gas Carrier Code  
IGF – International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels  
IMO – Organização Marítima Internacional  
LOHC – Transportadores Orgânicos Líquidos de Hidrogénio  
NDCs – Contribuições Nacionalmente Determinadas  
PESO – Sistemas de Otimização de Energia Portuária  
RNCZ – Roteiro Naval Carbono Zero  
SCR – Redução Catalítica Seletiva  
SEA Europe – Associação Europeia de Estaleiros e Equipamentos Marítimos  
TRL – Technology Readiness Level  
UE – União Europeia

# 1 Introdução

## 1.1 Identificação do Projeto

O **Roteiro Naval Carbono Zero (RNCZ)** é um projeto financiado pelo Programa de Recuperação e Resiliência (PRR), cuja entidades promotoras são o **Fórum Oceano – Cluster da Economia do Mar** e a **CEVAL - Confederação Empresarial do Alto Minho**. Encontra-se, neste momento, em período de execução.

## 1.2 Objetivos do Projeto

A prestação de serviços da HAEDES, enquanto consultora, consiste na elaboração de um **levantamento e análise documental (foco na EU e IMO) na temática da descarbonização e legislação aplicável** (este entregável), assim como um estudo detalhado sobre o desempenho ESG (Environmental, Social, and Governance) da frota de transporte marítimo global, abrangendo vários tipos de embarcações com tonelage superior a 5.000 GT (detalhados em caderno de encargos e memória descritiva) através de Levantamento de Informação Estatística Consolidada e Entrevistas a Armadores Internacionais (próximo entregável) por forma a identificar as características operacionais mais valorizadas e as lacunas tecnológicas que possam facilitar ou acelerar a descarbonização da indústria marítima.

A contribuição da HAEDES visa também **suportar o desenvolvimento do RNCZ**, em articulação com os demais parceiros, permitindo à indústria portuguesa de Construção, Reparação e Manutenção Naval (CRMN) especializar-se em soluções ESG e permitir um posicionamento estratégico na cadeia de valor industrial do setor

## 1.3 Estrutura do relatório

O presente relatório está organizado em 9 capítulos, desenvolvendo um levantamento documental e legislativo em torno da frota mundial de transporte (*shipping*), com o objetivo de servir de apoio à elaboração do RNCZ e à indústria de CRMN no que respeita a tendências de descarbonização a nível internacional – sustentabilidade, operacionalidade e competitividade:

1. **Introdução** ao projeto
2. Enquadramento e panorama geopolítico
3. Identificação e análise da legislação aplicável no contexto internacional, europeu e nacional
4. Aplicação de **práticas ESG** para o desenvolvimento sustentável do setor
5. **Casos de Estudo e Boas Práticas** Internacionais
6. Levantamento de **tecnologias para a descarbonização da Frota**
7. Breve enquadramento da **descarbonização dos Portos**
8. **Conclusões** e perspetivas futuras
9. Referências

# 2 Enquadramento e Panorama Geopolítico

Os objetivos de reduzir as emissões dos gases com efeito de estufa e proceder à descarbonização são, com maior ou menor compromisso, mundiais. A União Europeia (UE) não é exceção, encontrando-se alinhada com os objetivos estratégicos para a descarbonização e transição energética, como se desenvolve nos seguintes subcapítulos.

## 2.1 Objetivo comum: Descarbonização

A **União Europeia** compromete-se com a sustentabilidade em ambição e aplicabilidade através do “European Green Deal”, com o objetivo de atingir a neutralidade até 2050. A Lei do Clima, juridicamente vinculativa, estabeleceu custos para as emissões de carbono, através do “Emissions Trading System (ETS)”, focando em energias renováveis e eficiência energética. Adicionalmente, nações mais desenvolvidas possuem objetivos e trâmites legais relativos à descarbonização até 2050:

- Os **Estados Unidos da América** re-aderiram ao Acordo de Paris em 2021, visando a neutralidade de emissões até 2050 – estando em processo de saída do Acordo desde 20 de janeiro de 2025 deste ano por motivos de ideologia política. No mesmo território, o “Inflation Reduction Act” (2022), que promove a energia limpa e a descarbonização, encontra-se (ainda) operacional.
- No **Canadá** há um imposto sobre o carbono e um objetivo legal de atingir a neutralidade carbónica até 2050, bem como investimento em tecnologias limpas, hidrogénio, e captura de carbono.
- A **China** comprometeu-se a atingir a neutralidade carbónica até 2060, investindo fortemente em energia solar, eólica, e veículos elétricos, atingindo o pico de emissões em 2030.
- O **Japão** e a **Coreia do Sul** também se comprometeram com a neutralidade em 2050 e em investir em hidrogénio verde, energia eólica offshore, e captura de carbono.
- A **Austrália** também se comprometeu com a neutralidade carbónica.

Admite-se que a **União Europeia lidera a transição energética e sustentabilidade até 2050, em termos de ambição e aplicabilidade**, acompanhada das nações mais desenvolvidas financeiramente. As economias emergentes (alguns exemplos abaixo) apontam para mais tarde (2060-2070) e necessitarão de suporte adicional para descarbonizar enquanto desenvolvem as suas economias, quer financeiramente quer através de troca de conhecimento e capacitação ou implementação de mercados carbono - habitualmente negociados nas Conferências das Partes (COPs) das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima. Instituições como os Bancos Multilaterais de Desenvolvimento (ex: Banco Mundial), investimento privado, e filantropia também são parte ativa do processo.

- Na **Índia**, os objetivos de neutralidade são para 2070, focando na energia solar e eletrificação da ferrovia.
- Em **África**, apesar de não serem os maiores emissores, há o objetivo de implementar medidas de transição para energia verde, especialmente energia solar e hídrica – apoiados por nações com maiores capacidades financeiras. Na América do Sul também se comprometeram com a neutralidade carbónica. Não obstante os objetivos e premissas de descarbonização – acompanhados ou não de ações e trâmites legais, as nações definem ações globais e enfrentam vários desafios no que respeita à implementação e concretização dos objetivos de descarbonização (Tabela 1), nomeadamente: dependência de combustíveis fósseis, instabilidade política, perda de competitividade, entre outros.

*Tabela 1. Tabela-resumo dos objetivos e premissas de descarbonização à escala global (baseado em informação dos websites da Comissão Europeia, Fórum Económico Mundial, Agência Internacional de Energia (IEA), Nações Unidas (UN), Governo do Canadá, e Agência Proteção do Ambiente (EPA, USA).*

Visão Geral das premissas de Descarbonização à escala Global				
Região/País	Objetivo Neutralidade	Vinculação Legal	Ações Macro	Desafios
União Europeia	2050	Sim	ETS, Green Deal, renováveis, economia circular	Segurança energética, competitividade industrial
EUA	2050	Não	Inflation Reduction Act, regulações da Agência de Proteção do Ambiente (EPA), incentivos para veículos elétricos	Mudanças políticas, lobby dos combustíveis fósseis
China	2060	Não	Investimento em energia limpa, veículos elétricos, pico de emissões em 2030	Dependência do carvão, pressão sobre o crescimento económico

Índia	2070	Não	Reforço energia solar, eletrificação da ferrovia, mercados de carbono	Acesso à energia, pobreza, utilização de carvão
Japão	2050	Sim	Hidrogénio, eólicas offshore, carbono	Eliminação progressiva nuclear, importação de energia
Coreia do Sul	2050	Sim	Taxa de Carbono, Inovação tecnológica, fundos para transição verde	Estrutura industrial, ritmo de redução de emissões
Canadá	2050	Sim	Carbono, investimento em energia verde, limitações ao metano	Emissões de areias petrolíferas, direitos indígenas
Brasil	2050	Não	Proteção da Floresta tropical, Renováveis	Desmatamento, instabilidade política
África do Sul	2050	Não	Construção renovável, fundos transição justa	Dependência do carvão, desigualdade
Austrália	2050	Sim	Crescimento em energia solar e hidrogénio, reforma dos mercados de carbono	Economia da mineração, política climática



Dados das Nações Unidas revelam que, em 2022, as emissões de CO2 totalizaram 847 milhões de toneladas, refletindo um **aumento de 23% das emissões globais nos últimos 10 anos** (UNCTAD, 2022). À medida que os impactos climáticos se intensificam globalmente, **um relatório da mesma organização sobre Lacuna de Emissões (UN, 2024) conclui que os países devem apresentar ambição e ações mais fortes** na próxima rodada de Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), correndo o risco da meta de 1,5°C do Acordo de Paris estar fora de alcance dentro de poucos anos. Por outro lado, **instabilidades políticas e económicas poderão** ser contraproducentes para se atingirem estes mesmos objetivos.

Seja para as economias mais estáveis financeiramente ou as emergentes, as premissas de sustentabilidade – não obstante serem uma oportunidade para o desenvolvimento sustentável da sociedade e do planeta – poderão também apresentar desafios no que respeita a:

- 1) **Economia** - custos relacionados com conformidade, nomeadamente práticas de sustentabilidade, e investimentos necessários para cumprir regulamentação, bem como possível escassez de apoios e incentivos políticos/governamentais, afetando a competitividade.
- 2) **Competitividade** – quem se conseguir adaptar mais depressa terá vantagem competitiva, verificando-se o oposto para quem não conseguir acompanhar as exigências internacionais, nomeadamente em termos de infraestruturas e logística (ex: portos verdes ou indústria de construção, manutenção e reparação naval - CMRN). Assim, organizações de menor envergadura do ponto de vista operacional e organizacional, e com menor acesso a financiamento, poderão enfrentar dificuldades.
- 3) **Desafios de implementação** – disponibilidade e maturidade das tecnologias bem como adaptação dos trabalhadores a novas práticas.

## 2.2 O Transporte marítimo internacional e a Descarbonização

No comércio global, o **transporte marítimo é responsável pelo transporte** de cerca de 11 mil milhões de toneladas de mercadoria por ano, o que representa **aproximadamente 90% do volume total de comércio mundial** (Brooks, 2018). Contudo, é importante realçar que, segundo o International Chamber of Shipping, o **transporte marítimo só produz 2.2% das emissões totais globais de GEE**, valor menor que o transporte global e que a agricultura<sup>2</sup>. Segundo a Organização Marítima Internacional (IMO), as **emissões de gases com efeito de estufa (GEE) provenientes de toda a indústria marítima aumentaram de 977 milhões de toneladas em 2012 para 1,076 mil milhões de toneladas em 2018** (International Maritime Organization, 2020). Além disso, conforme indicado pelas Nações Unidas (WOM, 2023), a **emissão coletiva de gases de efeito estufa da frota global aumentaram 1.2% em 2022**. Segundo dados apresentados pela Marine Benchmark (Conferência Net Zero Maritime, Suécia, abril 2025), é possível observar a evolução das emissões anuais de CO<sub>2</sub> (em toneladas) da frota global de navios com número IMO (Fig. 1), calculadas com base em dados AIS (Sistema de Identificação Automática), entre janeiro de 2012 e março de 2025. Ao longo do período observa-se uma tendência geral de crescimento nas emissões, com algumas oscilações sazonais e descidas pontuais. A quebra registada em 2020 poderá estar associada a uma redução da atividade marítima global, eventualmente relacionada com a pandemia de COVID-19. Em 2024 verifica-se um pico histórico nas emissões, seguido de uma descida acentuada no início de 2025, seguida de uma posterior subida já no início deste ano, atingindo quase as 900 milhões de toneladas



Figura 1. Emissões anuais de CO<sub>2</sub> da frota global de navios com número IMO, com base em dados AIS, de janeiro de 2012 a março de 2025. Fonte: S&P Global & Marine Benchmark.

Não obstante o grande relevo do **transporte marítimo** dentro da UE, **representando cerca de 75 % do comércio externo e 31 % do comércio interno** em termos de volume, o tráfego de ou para os portos do Espaço Económico Europeu. Este representa cerca de **11 % do total das emissões de CO<sub>2</sub> na UE provenientes de transporte e entre 3 e 4 % de todas as emissões de CO<sub>2</sub> da UE** (EMSA, 2025). Assim, de acordo com o documento de trabalho de 9 de dezembro de 2020, intitulado "Estratégia de mobilidade sustentável e inteligente – os transportes europeus na senda do futuro" da Comissão Europeia, o transporte marítimo continua a ser o modo de transporte mais eficiente em termos de emissões de carbono por tonelada versus distância. Contudo, **prevê-se que as emissões de CO<sub>2</sub> provenientes do transporte marítimo aumentem se não forem tomadas novas medidas**.

Assim como na sociedade e economia em geral, as premissas e aplicabilidade de medidas e regulamentações de sustentabilidade para a indústria de transporte naval sob análise acarretam oportunidades e desafios para a economia e competitividade, a elencar:

### 1) Economia

**Desafios:** práticas de conformidade e sustentabilidade podem incorrer em custos e investimentos significativos devido à necessidade de **modernizar a frota** (novos combustíveis ou tecnologias de propulsão), aderir a tecnologias de **monitorização de emissões e eficiência energética**, proporcionar **formação e treino de tripulações** para operar novas tecnologias e seguir novos protocolos (treino contínuo que crie uma cultura de sustentabilidade) **reportar de forma transparente** – o que implica relatórios detalhados, auditorias frequentes e

independentes e envolvimento de partes interessadas da cadeia de valor. As recentes **alterações às políticas comerciais globais**, nomeadamente a imposição de tarifas (EMSA, 2025), poderão também ter **um impacto negativo no setor do comércio e transporte naval, aumentando custos e reduzindo a rentabilidade** devido ao redirecionamento de rotas (aumentando emissões).

**Oportunidades: incentivos políticos e governamentais** bem como **linhas de crédito com taxas de juro reduzidas para projetos sustentáveis**, isenções fiscais para empresas com boas práticas de sustentabilidade e descarbonização, iniciativas como o “Green Shipping Program” da União Europeia (EMSA, 2025).

## 2) Competitividade

**Desafios: investimentos avultados** para pequenas e médias empresas, **falta de uniformização e aumento de carga burocrática** uma vez que **diferentes regiões podem apresentar diferentes regulamentações e exigências, barreiras tecnológicas** devido a indisponibilidade (técnica ou financeira) de certas tecnologias, **diferentes fases de maturidade**, e compatibilidade com a componente operacional dos navios.

**Oportunidades: redução de custos operacionais a longo prazo** devido ao aumento da eficiência energética, reputação e marca reconhecidas no campo da sustentabilidade permitem a **atração de investidores e clientes alinhados** (como aliás se discutiu no workshop de auscultação no Algarve no que respeita ao agora exigido aos hotéis e indústria do turismo), **acesso mais exclusivo a certos mercados por imposições de portos e regiões que exigem conformidade com normas ambientais rigorosas**.

Em suma, as **premissas de sustentabilidade** (nomeadamente a descarbonização) e os **critérios ESG** em geral (Capítulo 4), estão a **transformar o setor de transporte naval** (EMSA, 2025). Preocupações com competitividade versus a exigência de uma implementação cuidadosa são válidas e embora se tenha identificado acima alguns desafios significativos, as oportunidades para inovação e liderança sustentável são também possíveis e um objetivo global. A capacidade de **adaptação e anti fragilidade** da indústria serão fatores determinantes para se posicionarem num futuro mais verde e próspero.

Ainda no âmbito da descarbonização, a designação de áreas geográficas de âmbito internacional (mares regionais) como as **Áreas de Emissões Controladas (ECAs)**, que têm um papel preponderante enquanto mecanismos para a descarbonização da indústria de transporte naval, interligando os diversos atores e partes interessadas. As ECAs possuem enquadramento legal (cap 3) e remetem para a redução de poluição com foco nas emissões de óxido de enxofre e de azoto, e de matéria particulada, exercendo pressão indireta sobre a indústria para a utilização de combustíveis mais limpos e descarbonização. A ECA do Atlântico Norte foi recentemente aprovada e a ECA do Mediterrâneo entrará em vigor dentro de alguns dias (cap 3), reforçando os compromissos de sustentabilidade no panorama mundial e europeu (Fig. 2).

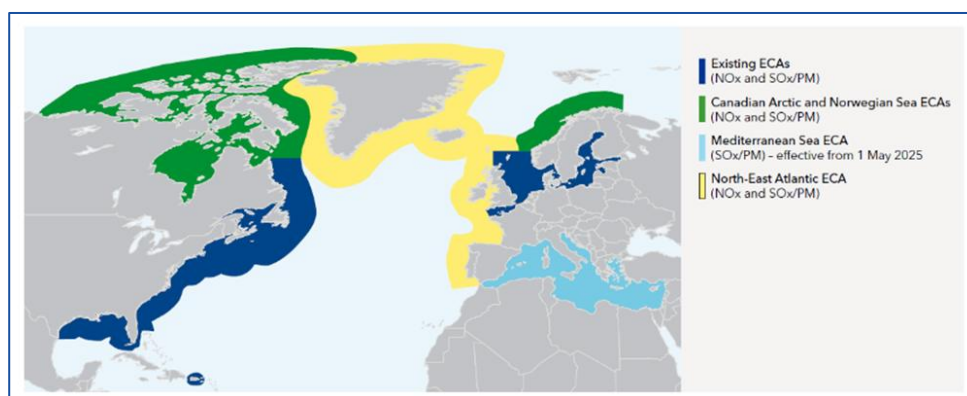


Figura 2. Áreas de Emissões Controladas (ECAs) pré-existent e recentes aplicadas ao contexto Atlântico.  
Fonte: Comunicação Técnica e Regulatória da DNV, Abril 2025.

Os **Corredores Verdes Marítimos** são rotas entre dois ou mais portos, onde as partes interessadas se comprometem a utilizar **embarcações ou infraestruturas de baixas emissões**, promovendo combustíveis alternativos, e ecossistemas colaborativos entre armadores, autoridades portuárias, reguladores e fornecedores (Fig. 3). Têm um papel mais direto e de maior impacto para a descarbonização. A sua implementação é voluntária, mas conta com apoio regulatório (cap 3).



Figura 3. Corredores Verdes internacionais em 2022. Fonte: ABS.

Do ponto de vista internacional, a **energia está a moldar a geopolítica**, e a própria dinâmica política internacional, molda o rumo da produção e consumo. Uma **adoção global da legislação** assegurará uma **concorrência leal** que motive a indústria a mover-se em prol do objetivo comum, onde a **competição é motor para a cooperação**. A forma como os Estados produzem, consomem e regulam a energia está intimamente ligada às dinâmicas de poder global (Komendantova & Neumueller, 2023). No contexto marítimo, pela sua relevância, este vínculo torna-se particularmente evidente. Contudo, o panorama global atual revela **desalinhamento entre as principais potências**, colocando em causa a transição global (S&P Global, 2023). Ao contrário da UE, que promove políticas ambiciosas, estratégias recentes assumidas por outras potências, revelam uma **reversão dos compromissos internacionais, como a saída do Acordo de Paris ou a anulação de regulações ambientais que visavam acelerar a transição para combustíveis mais limpos** (Wilson Center, 2023). Algumas potências, **dependentes da exportação de combustíveis fósseis, vêm a transição energética como uma ameaça à sua influência estratégica** (Komendantova & Neumueller, 2023; IMF, 2024). Esta tensão e disparidade distorce o caminho para a neutralidade carbónica, aumentando os riscos de concorrência desleal e comprometendo a viabilidade de soluções sustentáveis em larga escala, que requerem **investimentos e cadeias de abastecimento internacionais** (IMF, 2024). A IMO, apesar dos esforços que tem feito em medidas para que se atinja uma neutralidade carbónica, mostra-se menos ambiciosa que a EU.

O caminho para a descarbonização do transporte marítimo dependerá, em larga medida, da capacidade dos países e das instituições estabelecerem consenso. A transição é, além de tecnológica, uma questão de **cooperação, confiança e visão partilhada** condicionada por três eixos principais: **harmonização regulatória internacional, mobilização de financiamento, e partilha de conhecimento e cooperação**. A ausência de um destes pilares pode comprometer os outros dois, criando assimetrias profundas que dificultam o progresso global Wilson Center, 2023.

## Caso de Estudo 1 | SWOT – Transporte Naval *versus* Sustentabilidade

### FORÇAS

- Alta eficiência energética por tonelagem transportada
- Escala global e infraestrutura e cadeia logística consolidada
- Avanços tecnológicos em curso
- Compromissos e regulamentação internacional

### OPORTUNIDADES

- Inovação em combustíveis alternativos
- Financiamento verde e ESG
- Pressão dos consumidores e cadeia de valor mais exigente com pegada de carbono
- Digitalização e automação

### FRAQUEZAS

- Dependência de combustíveis fósseis
- Alto custo de modernização da frota
- Complexidade Regulatória
- Incertezas sobre combustíveis alternativos
- Falta de mecanismos de financiamento e incentivos direcionados ao setor



### AMEAÇAS

- Sanções e penalidades regulatórias
- Concorrência entre rotas e corredores logísticos mais verdes
- Riscos de Imagem e Reputação
- Volatilidade no preço dos combustíveis verdes

## 2.3 Enquadramento Geopolítico e Estratégico para Portugal

**Portugal**, a oeste na costa Atlântica da Europa, é **ponte natural para África, Américas, e a própria Europa**. Possui vários portos, sendo o de **Sines o maior porto de águas profundas do país** e um dos mais importantes da Europa – recebendo mega cargueiros, estando ligado a várias rotas marítimas internacionais, e servindo como ponto de entrada e saída para mercadorias europeias: cadeias de abastecimento de energia (gás natural liquefeito - GNL), bens industriais, e agrícolas. As rotas incluem: América do Sul (Brasil), África Ocidental (Angola, Moçambique), e Canal do Suez (ligação com o Médio Oriente e Ásia). A proximidade aos Açores e Madeira, plataformas logísticas no Atlântico, aumentam a versatilidade estratégica e relevância geopolítica do país.

O **Porto de Sines** lidera em volume de carga e transbordo com **investimentos crescentes em digitalização e automação**. Os Portos de Leixões, Lisboa e Setúbal complementam a rede, mas enfrentam desafios em modernização e competitividade.

Pertencendo à União Europeia, **Portugal está vinculado a políticas comuns de sustentabilidade, transporte, energia e ambiente** e adota regulações internacionais sobre segurança e sustentabilidade no transporte marítimo. Este enquadramento geopolítico traduz-se em alguns desafios e oportunidades, nomeadamente no que respeita à competição com portos do Norte da Europa (ex: Roterdão e Antuérpia) pela necessidade de aceleração da descarbonização, adaptação tecnológica, e melhorias das fragilidades em ligações ferroviárias e logísticas, aumento do tráfego marítimo no Atlântico com a instabilidade no Mar Vermelho (ex: crise no Canal do Suez), investimentos em **corredores verdes marítimos** e desenvolvimento de hubs de energia renovável nos portos (hidrogénio verde, eólica offshore, outras).

Diante dos desafios geopolíticos e ambientais em rápida evolução, a indústria marítima europeia encontra-se num momento crucial. **Os setores marítimos — desde a construção e reparação naval até à logística portuária — são pilares da economia da UE e essenciais para alcançar os objetivos ambientais, autonomia estratégica e liderança tecnológica da Europa: Portugal não deverá ser exceção**. Em Abril de 2025, e com vista à competitividade, no Parlamento Europeu, um intercâmbio organizado pelo grupo SEArica com o apoio da Conferência das Regiões Periféricas Marítimas (CPMR) e da Associação Europeia de Estaleiros e Equipamentos Marítimos (SEA Europe) reuniu deputados, responsáveis políticos, representantes regionais, líderes industriais e stakeholders marítimos para traçar um novo rumo para o futuro do setor, aprovando um **Manifesto Conjunto para uma Estratégia Industrial Marítima Europeia**, coassinado pela CPMR e pela SEA Europe. O Manifesto visa **revitalizar a base industrial marítima da Europa**, que tem sido enfraquecida pela intensa concorrência global com mais acesso a fundos públicos, elencando a necessidade do **aumento de financiamento público e privado**

para modernizar infraestruturas e impulsionar a inovação tecnológica, tecnologias marítimas limpas com incentivos regulamentares ligados ao conteúdo e produção europeus, e investimento em I&I.

Portugal, partilhando desafios e oportunidades de uma estratégia europeia consolidada, tem **potencial estratégico no âmbito do shipping sustentável** no Atlântico por conciliar uma posição geográfica excepcional, infraestruturas portuárias modernas (especialmente Sines), compromisso com as metas climáticas da UE, e uma tradição marítima enraizada na sua identidade cultural e etnográfica.

## Caso de Estudo 2 | SWOT – Transporte Naval Sustentável versus Portugal

### FORÇAS

- Localização estratégica
- Porto de Sines com águas profundas e escala para grandes navios
- Integração nas políticas e fundos da UE
- Compromissos com descarbonização e energia verde
- Cooperação lusófona em rotas comerciais e políticas marítimas

### FRAQUEZAS

- Conectividade ferroviária e rodoviária ainda limitadas
- Portos secundários com dificuldades de modernização
- Baixa capacidade de inovação tecnológica no setor privado nacional
- Risco de dependência de fundos externos (UE, investimentos estrangeiros)

### OPORTUNIDADES

- Investimento europeu em portos verdes e corredores sustentáveis
- Diversificação de rotas atlânticas com instabilidade no Canal do Suez
- Transição energética & indústria marítima
- Desenvolvimento de hubs (GNL, hidrogénio e eólica offshore)
- Digitalização e automação com apoio da UE



### AMEAÇAS

- Custo crescente da regulação ambiental
- Concorrência de portos com menor exigência ambiental
- Atraso tecnológico e perda de tráfego de transbordo
- Pressão adaptativa sobre armadores nacionais e empresas
- Riscos geopolíticos e aumento do protecionismo no comércio internacional

## 3 Análise de Legislação | Descarbonização Da Frota Naval (Aplicável a Embarcações Acima De 5000 Ton Arqueação Bruta)

### 3.1 Legislação Internacional (IMO)

A **Convenção MARPOL – Anexo VI**, pela Organização Marítima Internacional (IMO) regula as emissões marítimas e trata da prevenção da poluição atmosférica causada por navios. A versão mais recente do Anexo VI da MARPOL foi emendada pela Resolução MEPC.328(76), adotada em junho de 2021 e com entrada em vigor ao 1º de novembro de 2022, visando a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) de navios.

A **descarbonização naval é retratada no Capítulo 4** – Regulamentação sobre a intensidade carbónica do transporte marítimo internacional, do Anexo VI da MARPOL. Os regulamentos apresentados nesse capítulo são aplicáveis a todas as embarcações igual ou acima de 400 toneladas de arqueação bruta. Os regulamentos 22, 23, 24 e 25 não se aplicam a navios com propulsão não convencional, exceto os regulamentos 22 e 24 que se aplicam

a navios de cruzeiro para passageiros com propulsão não convencional e a transportadores de GNL com propulsão convencional ou não convencional, entregues em ou após 1 de setembro de 2019, conforme definido no regulamento 2.2.1. Os regulamentos 23 e 25 aplicam-se a navios de cruzeiro para passageiros com propulsão não convencional e a transportadores de GNL com propulsão convencional ou não convencional. Os regulamentos 22, 23, 24, 25 e 28 não se aplicam a navios da categoria A, conforme definido no Código Polar.

Este capítulo estabelece regulamentos para vários índices, planos, reporte, e indicadores relacionados com emissões e sustentabilidade, de entre eles:

- **EEDI** (Energy Efficiency Design Index): Índice de eficiência energética para novos navios.
- **EEXI** (Energy Efficiency Existing Ship Index): Índice de eficiência energética para navios existentes.
- **SEEMP** (Ship Energy Efficiency Management Plan): Plano de gestão da eficiência energética exigido para todos os navios.
- **Recolha e comunicação de dados sobre o consumo de óleo** dos navios para monitorização de GEE.
- **CII** (Carbon Intensity Indicator): Índice de intensidade de carbono que mede as emissões de CO<sub>2</sub> em relação à tonelagem-milha de cada navio.

Foram emitidas várias adendas relacionadas com a listagem e objetivos acima referidos, de entre as várias estratégias e medidas, as mais relevantes são representadas abaixo (Figura 4).

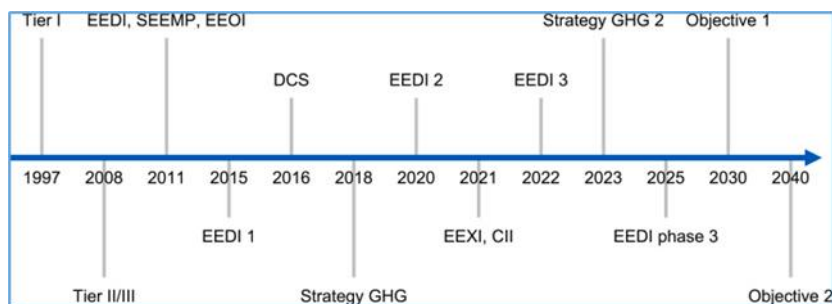


Figura 4. Legislação importante pela IMO para prevenir a poluição atmosférica causada por navios.  
Fonte: Kondratenko et al., 2025.

As primeiras medidas (Tier I-III) tinham por **objetivo tornar mais verdes os designs dos navios através da introdução de limites para as emissões de NOx, SOx e PM** de embarcações de 400 GT ou maiores. A introdução destas medidas deu origem a um **aumento do uso de LNG** como combustível, e a um **decréscimo nas emissões de NOx e SOx nas áreas de emissões controladas**. O sucesso desta medida levou a IMO a **adotar mais medidas para redução das emissões** por navios, nomeadamente de CO<sub>2</sub>. Em **primeira instância, foi adotado o Índice de Eficiência Energética na Fase do Projeto (EEDI)** para navios de nova construção (IMO 2018). Apesar deste índice ter sido inicialmente desenvolvido para descarbonizar os navios na fase de construção, ele atualmente é **usado para fornecer orientações sobre como estimar de forma simples as futuras emissões de um navio por unidade de carga transportada**. Este índice tem sido atualizado, para fases 1 e 3 (Figura 1), à medida que surgem novas exigências, como a atualização das metas de redução nas emissões de GEE, que passaram de 10% para 20% e 30%. No entanto, esta medida pode ser ambígua, uma vez que se baseia na limitação da **potência instalada do motor, o que nem sempre se traduz numa minimização efetiva das emissões de CO<sub>2</sub>** (Psaraftis, 2019) – surgindo entre alguns autores a necessidade de rever este índice. Com o intuito de **incentivar os armadores à modernização da frota existente** foi introduzido, em 2021, o **Índice de Eficiência Energética Operacional para Navios Existentes (EEXI)**, semelhante ao EEDI, mas **aplicável a navios já em fase operacional** (Kondratenko et al., 2025).

Os indicadores de Eficiência Energética Operacional (EEOI) e o Plano de Gestão da Eficiência Energética dos Navios (SEEMP) foram as primeiras medidas tomadas pela IMO para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> (IMO, 2011). Uma medida adicional significativa foi a adoção, por parte da IMO, do **sistema obrigatório de recolha de dados**, que exige que **navios com arqueação bruta igual ou superior a 5000 GT registem e reportem o seu consumo de combustível**. As informações recolhidas de todos os navios abrangidos por esta obrigação são guardadas na base de dados da IMO, fornecendo assim dados essenciais para o desenvolvimento de futuras soluções de descarbonização (IMO, 2016).

Para cumprir e alinhar com os objetivos do Acordo de Paris e com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas, a IMO adotou em 2018 a sua **primeira estratégia para a redução dos GEE, tal como mais tarde a sua segunda - Strategy GHG e Strategy GHG 2**, respetivamente. O Objetivo 1 desta estratégia propõe uma **redução de 40 % nas emissões de CO<sub>2</sub> e uma redução de 20 % nas emissões anuais de GEE por**

**tonelada-quilômetro transportada até 2030**, em comparação com 2008. O Objetivo 2 recomenda uma **redução de 70 % das emissões anuais de GEE por tonelada-quilômetro até 2040**, também face a 2008. Esta estratégia é ambiciosa e exige ações imediatas para se cumprirmos os objetivos, **como impor emissões zero para todos os navios de nova construção e substituir completamente a frota existente**, contudo:

- As tecnologias necessárias e as infraestruturas associadas ainda não se encontram suficientemente desenvolvidas ou em fase de maturação para uma implementação comercial em larga escala.
- A frota existente e os navios atualmente em construção não podem ser desmantelados de uma só vez sem causar um colapso económico e social.

A versão mais recente desta estratégia data de julho de 2023, com a adoção, por parte da IMO, da "Estratégia de Redução das Emissões de Gases com Efeito de Estufa dos Navios 2023", durante a 80.ª sessão do Comité de Proteção do Meio Marinho (MEPC 80). Esta estratégia define metas ambiciosas para o setor, nomeadamente atingir o pico das emissões de gases com efeito de estufa provenientes do transporte marítimo internacional o mais rapidamente possível e **alcançar emissões líquidas nulas por volta de 2050**, tendo em conta as diferentes circunstâncias nacionais.

Associadas aos regulamentos da IMO foram desenvolvidas normas ISO relacionadas à descarbonização naval para embarcações de grande porte, nomeadamente:

- ISO/WD 23656, que estabelece requisitos gerais para a gestão da qualidade dos dados recolhidos de navios, necessários para calcular índices ambientais, como o Indicador de Intensidade de Carbono (CII). Esses requisitos aplicam-se à gestão da qualidade dos dados de todos os navios de carga acima de 5.000 GT.
- ISO 19030, que estabelece métodos para medir a alteração no desempenho de casco e hélice, fatores que influenciam diretamente na eficiência energética e nas emissões de gases de efeito estufa dos navios.

**Net-Zero Framework** | Aprovada pelo Comité de Proteção do Meio Ambiente Marinho durante a 83ª sessão (MEPC 83), de 7 a 11 de abril de 2025, é o primeiro mecanismo no mundo a **combinar limites obrigatórios de emissões e atribuição de preços de GEE em todo um setor industrial**.

As medidas incluem um **novo padrão de combustível para navios e um mecanismo global de valorização económica (preço) de emissões** e serão obrigatórias para grandes navios oceânicos com arqueação bruta superior a 5.000 toneladas (que emitem 85% do total de emissões de CO2 do transporte marítimo internacional). Serão incluídas num novo **Capítulo 5 do Anexo VI** (Prevenção da poluição do ar por navios) da MARPOL.

Principais Medidas Regulatórias: **Padrão Global de Combustível** (GFI – Intensidade de Combustível com Emissão de GEE) - **navios reduzirão progressivamente a intensidade anual de gases de efeito estufa (GEE) por unidade de energia e o GFI será calculado com base na abordagem “do poço à hélice”**.

Medidas Económicas: **Navios que excederem os limites do GFI deverão adquirir unidades corretivas** para compensar as suas emissões. **Navios que utilizarem tecnologias de emissão zero ou quase zero poderão receber recompensas** financeiras.

Conformidade: Meta Base – limite padrão de conformidade. Meta de Conformidade Direta – ao atingir essa meta, o navio pode gerar unidades excedentes. Formas de compensar o excesso de emissões: utilizar unidades excedentes acumuladas, transferir unidades excedentes de outros navios. Adquirir unidades corretivas por meio de contribuições ao **Fundo Net-Zero da IMO**.

O Fundo Net-Zero da IMO será financiado por contribuições baseadas em emissões; os recursos serão utilizados para: oferecer incentivos a navios de baixa emissão, apoiar inovação, pesquisa e infraestrutura, especialmente em países em desenvolvimento, financiar capacitação, formação e transferência de tecnologia conforme a Estratégia de GEE da IMO, e mitigar impactos negativos em Estados vulneráveis (ex: Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento – SIDS – e Países Menos Desenvolvidos – PMDs).

**Cronograma de Implementação:** Outubro de 2025 (MEPC/ES.2) – Adoção das emendas, Primavera de 2026 (MEPC 84) – Aprovação das diretrizes detalhadas de implementação, 2027 – Entrada em vigor esperada (16 meses após a adoção).

## 3.2 Legislação Europeia

**EU ETS** | Desde 2024, o transporte marítimo (navios com 5000 GT ou mais que entrem em portos da UE, independentemente da bandeira que ostentem) passou a ser gradualmente incluído no **EU ETS, (Sistema de Comércio de Licenças de Emissão da União Europeia)** que foi estabelecido pela Diretiva 2003/87/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 13 de outubro de 2003, que estabelece um regime de comércio de licenças de emissão de gases com efeito de estufa dentro da Comunidade e altera a Diretiva 96/61/CE do Conselho. A legislação original foi alterada várias vezes à medida que o sistema evoluiu. As alterações mais recentes foram adotadas na Diretiva (UE) 2023/958 e na Diretiva (UE) 2023/959, como parte da iniciativa "fit for 55" da UE, que visa garantir que as políticas da UE estejam em conformidade com os objetivos climáticos da Lei Europeia do Clima e os compromissos assumidos no Pacto Ecológico Europeu e no Acordo de Paris.

O sistema abrange: **50% das emissões de viagens com origem ou destino fora da UE (permitindo que o país terceiro decida sobre a parte restante das emissões); 100% das emissões ocorridas entre dois portos da UE e quando os navios estão em portos da UE.** O regulamento EU ETS cobre as emissões de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), CH<sub>4</sub> (metano) e N<sub>2</sub>O (óxido nitroso), embora os dois últimos apenas sejam incluídos a partir de 2026.

As emissões do transporte marítimo estão incluídas no limite global do ETS, que define o montante máximo de gases com efeito de estufa que pode ser emitido ao abrigo do sistema. Este **limite é reduzido ao longo do tempo para garantir que todos os setores do ETS contribuam para os objetivos climáticos da UE.** Desta forma, o sistema incentiva a **eficiência energética, soluções de baixo carbono e a redução da diferença de preço entre combustíveis alternativos e combustíveis marítimos tradicionais.**

Na prática, as empresas de transporte marítimo devem adquirir e entregar (utilizar) licenças de emissão do EU ETS para cada tonelada de CO<sub>2</sub> (ou equivalente de CO<sub>2</sub>) reportada no âmbito do sistema. Cabe às autoridades responsáveis dos Estados-Membros da UE garantir o cumprimento das regras, aplicando regulamentos semelhantes aos dos outros setores abrangidos pelo ETS (aviação, indústrias, etc). Para assegurar uma transição gradual, as empresas de transporte marítimo só terão de entregar licenças para uma parte das suas emissões durante um período de introdução faseada: 2025: 40% das emissões reportadas em 2024; 2026: 70% das emissões reportadas em 2025; A partir de 2027: 100% das emissões reportadas.

Foi incluída uma cláusula de monitorização e revisão para acompanhar a aplicação das regras ao setor marítimo e considerar os desenvolvimentos relevantes na IMO. Assim, o sistema baseia-se nas disposições já em vigor para outros setores do EU ETS, bem como no recentemente revisto Regulamento da UE para Monitorização, Comunicação e Verificação das emissões do transporte marítimo (Regulamento Marítimo MRV, abaixo).

**EU MRV** | O **Regulamento Marítimo EU MRV** (Monitorização, Comunicação e Verificação, Regulamento (UE) 2015/757 emendado pelo Regulamento (EU) 2023/957 desde 1 janeiro de 2025) estabelecem um quadro obrigatório para a monitorização, comunicação e verificação das emissões de gases com efeito de estufa do setor do transporte marítimo. Este regulamento, recentemente atualizado para alinhar com o EU ETS, integra gradualmente o setor marítimo no mercado de carbono da UE. Aplica-se a navios com arqueação bruta igual ou superior a 5000 toneladas que escalem portos da UE, independentemente da bandeira que ostentem. Emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) provenientes do transporte marítimo, abrangendo: Viagens entre portos da UE (100% das emissões contabilizadas).

Viagens com origem ou destino fora da UE (50% das emissões contabilizadas). Emissões geradas enquanto os navios estão atracados em portos da UE. As empresas de transporte marítimo elegíveis ao abrigo do Regulamento Marítimo MRV são responsáveis por:

- **Monitorizar o consumo de combustível, emissões de CO<sub>2</sub> e outros parâmetros operacionais.**
- **Reportar anualmente os dados das emissões para cada navio** que opera dentro do âmbito do regulamento.
- Submeter os relatórios a **verificação independente** por entidades acreditadas.
- Assegurar **conformidade** com os requisitos, sob supervisão das autoridades dos Estados-Membros da UE.

**FUEL EU** | O **Regulamento Marítimo FuelEU (EU 2023/1805)** relativo à utilização de combustíveis renováveis e hipocarbónicos nos transportes marítimos, que altera a Diretiva 2009/16/CE, tem por objetivo **aumentar a utilização de combustíveis renováveis e hipocarbónicos e substituir fontes de energia nos transportes marítimos**, em consonância com o objetivo de alcançar a neutralidade climática até 2050 - garantindo simultaneamente o bom funcionamento do transporte marítimo, criando segurança regulamentar para a adoção de combustíveis renováveis e hipocarbónicos e de tecnologias sustentáveis, e evitando distorções no mercado interno. Este regulamento aplica-se a todos os **navios de arqueação bruta superior a 5000 toneladas, que escalem na UE independentemente da bandeira que ostentem.**

O Regulamento "FuelEU Transportes Marítimos" é uma parte fundamental do pacote de medidas Objetivo 55 da UE com objetivo de concretizar o Pacto Ecológico Europeu. O regulamento foi adotado em conjunto com o

**Regulamento (UE) 2023/1804 relativo à criação de uma infraestrutura para combustíveis alternativos.** Dentro destas metas e regras, é expectável que a intensidade de gases com efeito de estufa dos combustíveis utilizados pelo setor da navegação diminua ao longo do tempo, em 2 % em 2025 para até 80 % até 2050. O regulamento prevê igualmente que os combustíveis certificados para a redução da intensidade de gases com efeito de estufa são os combustíveis renováveis de origem não biológica, e que a partir de 2030, os navios de contentores (e passageiros) serão obrigados a utilizar um aprovisionamento de energia em terra para todas as necessidades de eletricidade enquanto se encontram ancorados em grandes portos da UE para atenuar a poluição atmosférica (eletrificação dos portos). Remete, então, para emissões associadas ao consumo de energia a bordo, incluindo enquanto os navios estão atracados. O regulamento é aplicável a partir de 1 de janeiro de 2025, com exceção de dois artigos relacionados com o plano de monitorização que são aplicáveis a partir de 31 de agosto de 2024.

Com o fim de reforçar o compromisso climático da União com o Acordo de Paris, adotado no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas ("Acordo de Paris"), o **Regulamento (UE) 2021/1119** visa reduzir, até 2030, as emissões de GEE (emissões após dedução das remoções) em, pelo menos, 55 % em relação aos níveis de 1990 e coloca a União numa trajetória para alcançar a neutralidade climática, o mais tardar, até 2050.

### 3.3 Legislação Nacional

Portugal, como Estado-membro da UE, transpõe as Diretivas Europeias e segue os regulamentos EU ETS (complementados pelos regulamentos EU MRV) e FuelEU Maritime. O **Decreto-Lei n.º 87/2020**, de 15 de outubro, assegura a execução e garante o cumprimento, na ordem jurídica nacional, do Regulamento (UE) 2015/757 (EU MRV), no que respeita à monitorização, comunicação e verificação das emissões de CO<sub>2</sub> provenientes do transporte marítimo.

A Agência Portuguesa do Ambiente (APA) é a entidade responsável pela implementação e supervisão destas medidas em Portugal. A APA garante que as empresas de transporte marítimo abrangidas devem monitorizar e comunicar os dados relativos às emissões agregadas das atividades de transporte marítimo a nível da companhia, em conformidade com as regras estabelecidas no Regulamento (UE) 2015/757. Além disso, em Portugal, a adaptação a estas regras também passa por iniciativas e incentivos à eficiência energética e aos combustíveis alternativos como:

- **Estratégia Nacional para o Mar 2021-2030**, aprovada pela **Resolução do Conselho de Ministros n.º 68/2021**, que estabelece diretrizes para o desenvolvimento sustentável do setor marítimo, alinhando-se com os objetivos de descarbonização e promovendo a economia azul.

Na ótica do financiamento, o **Programa "Navegação Ecológica"**, integrado no Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), disponibiliza 50 milhões de euros para apoiar a descarbonização do transporte marítimo de mercadorias e passageiros. O objetivo é modernizar pelo menos 10 embarcações, adaptando-as para serem "navios não poluentes" ou com "nível nulo de emissões", sendo que 70% deveriam possuir mais de 5000 toneladas de arqueação bruta.

### 3.4 Conclusões

Na conferência Net Zero Maritime (Suécia, Abril de 2025), a Transport & Environment (defensores dos transportes e energia limpos na Europa) fez um contributo importante ilustrando o nível de ambição das principais medidas internacionais (IMO) e da legislação Europeia (EU) e as possíveis trajetórias-resposta da indústria de transporte naval em matéria de emissões (Fig. 5). Conclui-se que o FuelEU é mais exigente que os objectivos-base de redução de emissões da IMO, criando um panorama descendente até 2050. Ao mesmo tempo, os diferentes combustíveis disponibilizados (cap. 6) contribuirão para a redução dessas mesmas emissões através de combustíveis mais limpos enquanto se aumenta a eficiência energética.

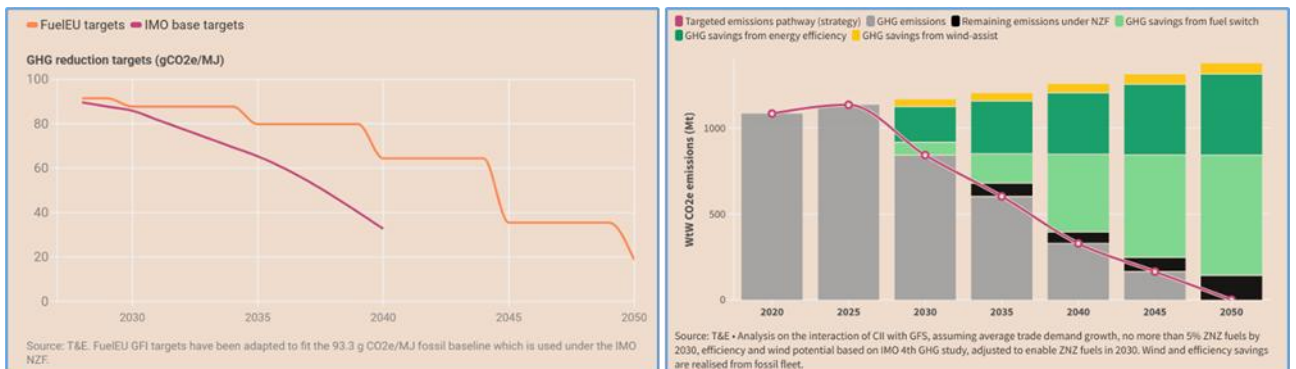


Figura 5. FuelEU objetivos de emissões (GFI) considerando o cenário base da IMO (esquerda) e interação entre emissões e diferentes tipos de estratégias de emissões (direita). Fonte: Transport & Environment.

Ainda de acordo com a análise feita pela Transport & Environment (Figura 6), as metas estabelecidas promovem apenas reduções moderadas, deixando uma parte significativa das emissões sem controlo, especialmente a curto e médio prazo.

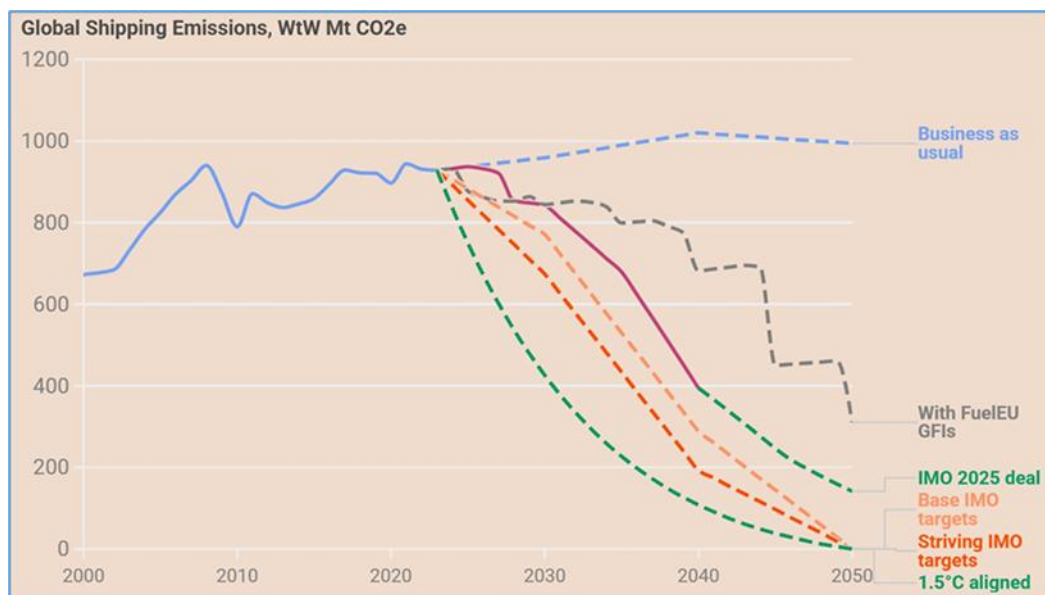


Figura 6. As projeções pré-2018 são baseadas nos 2º, 3º e 4º estudos da IMO sobre gases com efeito de estufa. As projeções pós-2018 usam dados da DNV (2024) e cálculos da T&E, baseados num cenário de baixo crescimento. A trajetória alinhada com 1,5 °C é baseada.

O cenário "business as usual" prevê emissões elevadas sem medidas adicionais, enquanto o acordo da IMO de 2025, embora mais ambicioso, permanece distante do alinhamento com os objetivos do Acordo de Paris (limite de 1,5 °C). A partir de 2041, será necessária uma trajetória muito mais exigente para corrigir este desvio. A meta de 65% de redução da intensidade dos gases com efeito de estufa até 2040 é positiva, mas só a introdução de penalizações mais elevadas e a promoção de e-fuels, por exemplo, poderá acelerar a transição. Além disso, o mecanismo de comercialização de unidades excedentes (Surplus Units) poderá incentivar os navios a superar os requisitos mínimos de redução, criando uma dinâmica de mercado favorável à descarbonização, num mercado de carbono.

## 4 ESG e o Desenvolvimento Sustentável

No âmbito das premissas de descarbonização, reporte, e conformidade, o **ESG** (Environmental, Social and Governance, (Ambiental, Social e Governança, em português) trata-se de um conjunto de critérios utilizados para avaliar a **sustentabilidade e impacto** de empresas e investimentos.

Em matéria **ambiental**, foca-se na **redução de emissões de GEE**, sendo que para a frota mundial isso implica CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e NO<sub>x</sub> através da adoção de **combustíveis alternativos**: GNL (gás natural liquefeito), metanol verde, hidrogênio, amônia verde, biodiesel, introdução de **navios elétricos e híbridos, reconversão de navios antigos** com motores mais eficientes. Também é objetivo aumentar a **eficiência energética** sendo que, através dos instrumentos regulatórios previamente mencionados, vários indicadores são utilizados para avaliar o desempenho ambiental das embarcações: **EEDI, EEXI, SEEMP, CII**.

No que remete a **tecnologias de descarbonização**, são avaliadas a utilização e adoção de medidas tecnológicas como: utilização de velas rígidas modernas, rotores Flettner (propulsão eólica auxiliar), revestimentos de casco com menor atrito, sistemas de recuperação de calor residual, digitalização e automação para rotas otimizadas, entre outras.

O cumprimento do MRV implicará **monitorizar emissões por rota e por navio, e transparência no seu reporte** no que respeita a metas anuais de emissões e redução.

Não obstante as premissas e objetivos de sustentabilidade do setor e da UE, como previamente identificado, os mesmos poderão ter impactos sobre a competitividade e sustentabilidade financeira do setor atendendo à instabilidade geopolítica internacional e falta de alinhamento entre objetivos estratégicos, soberanos e comunitários. Assim, e também em resposta à **crise energética e climática**, as medidas de reporte ESG previamente exigidas foram flexibilizadas na proposta **pacote Omnibus** ao Parlamento Europeu.

O pacote Omnibus (Comissão Europeia) simplifica e otimiza as regras de sustentabilidade na União Europeia (UE), equilibrando competitividade económica e transição sustentável, reduzindo encargos administrativos e promovendo um ambiente de negócios mais favorável. As principais alterações abrangem:

- Diretiva de Reporte Corporativo de Sustentabilidade (CSRD)
- Diretiva de Diligência Devida em Sustentabilidade Corporativa (CSDDD)
- Mecanismo de Ajustamento Carbónico Fronteiriço (CBAM)
- Regulamento InvestEU
- Regulamento da Taxonomia da UE

O Pacote Omnibus introduz várias alterações que afetam o transporte marítimo internacional, especialmente no que diz respeito ao Mecanismo de Ajustamento Carbónico Fronteiriço (CBAM), que regula as **emissões de carbono associadas a produtos importados para a UE**.

As mudanças propostas visam simplificar o processo para importadores, incluindo a isenção para pequenos importadores que movimentam menos de 50 toneladas anuais de bens sujeitos ao CBAM, o que **beneficia cerca de 90% dos importadores sem comprometer os objetivos ambientais**. Além disso, há uma **simplificação nos cálculos de emissões e na autorização de declarantes**, bem como um **reforço na fiscalização contra fraudes** para evitar práticas abusivas que prejudiquem os objetivos climáticos da UE.

Inclui também **fundos adicionais para digitalização e sustentabilidade** no setor dos transportes, **acelerando projetos ferroviários ligados a portos** (como ligação Sines–Caia–Europa Central), e **incentivos à criação de corredores verdes marítimos** (rotas de transporte com baixas emissões).

## 5 A Teoria Aplicada: Casos De Estudo e Boas Práticas

A descarbonização do transporte marítimo é fundamental para reduzir as emissões globais de GEE. Embora a maioria do setor energético da UE tenha reduzido as emissões, as **emissões do setor dos transportes aumentaram**. Este setor, incluindo **transporte marítimo e aviação, representa cerca de um terço das emissões totais** (Silva et al., 2022).

De seguida apresentam-se casos de estudo e de boas práticas de diversos países em matéria de sustentabilidade e descarbonização e o caso-exemplo de um navio e respetivos indicadores ESG prementes (este assunto será explorado de forma mais extensa no próximo entregável, a conter estatística consolidada em matéria de sustentabilidade e ESG para a frota/armadores no panorama internacional).

## 5.1 Caso de estudo – Finlândia

A Finlândia tem sido um dos países que assumiu compromissos ambiciosos no combate às alterações climáticas. A sua Lei do Clima, aprovada em 2022, estabelece **metas de redução de emissões de GEE de 60% até 2030, 80% até 2040 e entre 90 a 95% até 2050** - em comparação com os níveis de 1990. O país também definiu como objetivo **atingir a neutralidade carbónica até 2035**, posicionando-se entre os mais ambiciosos da Europa nesta matéria.

No setor marítimo, embora não existam metas nacionais específicas para as emissões dos navios, a **Finlândia compromete-se a cumprir os objetivos definidos pela Organização Marítima Internacional (IMO) e pela União Europeia**. A Associação dos Armadores da Finlândia, por sua vez, propõe-se a **alcançar uma frota neutra em carbono até 2050**, sinalizando o empenho do setor privado nesta transição (Ministério Finlandês de Transportes e Comunicações, 2021).

A abordagem finlandesa reconhece que **diferentes tipos de embarcações e rotas requerem soluções energéticas distintas**. Assim, estão a ser **exploradas várias alternativas de combustível** em simultâneo, incluindo gás natural liquefeito (GNL), biogás liquefeito (LBG), biocombustíveis drop-in, metanol, hidrogénio (H<sub>2</sub>), amónia (NH<sub>3</sub>) e combustíveis sintéticos. Para apoiar esta diversificação, estão a ser **mobilizados financiamentos nacionais adicionais para investigação e inovação**, com foco nas tecnologias que melhor se adaptem às condições do Mar Báltico (Ministério Finlandês de Transportes e Comunicações, 2021).

Uma medida relevante em curso é a intenção de **aplicar taxas reduzidas de eletricidade às ligações elétricas nos portos**, tal como já ocorre em países vizinhos como a Suécia e a Dinamarca. Esta alteração permitirá que a **eletricidade usada por navios em operação nos portos comerciais finlandeses beneficie da taxa mais baixa de imposto sobre eletricidade**. A expansão da infraestrutura de distribuição será alinhada com o novo regulamento europeu sobre combustíveis alternativos (Governo finlandês, 2022). Outras ações prioritárias incluem **o apoio financeiro a inovações na construção naval que resultem em emissões mais baixas**, bem como a avaliação da criação de um sistema de **incentivos para reconversão e aquisição de navios mais sustentáveis**. A **digitalização** surge igualmente como uma alavanca importante, não só para **melhorar a eficiência energética do transporte marítimo**, mas também para **reforçar o papel dos portos como pontos logísticos sustentáveis** (Governo finlandês, 2022).

No âmbito da sua política marítima, a Finlândia também pretende **contribuir ativamente para a definição de metas e medidas internacionais de descarbonização** (nomeadamente na IMO, UE e cooperação nórdica), promover a **digitalização dos fluxos de dados nos portos e corredores logísticos**, e posicionar o **Mar Báltico como zona de testes para tecnologias de navegação autónoma**. Além disso, está a ser dada prioridade ao planeamento e desenvolvimento de **energia marítima renovável**, garantindo simultaneamente que os portos estejam preparados para fornecer combustíveis sustentáveis no futuro

## 5.2 Caso de estudo – Dinamarca

A **Dinamarca pode ser vista como um dos exemplos de boas práticas** a nível mundial no que diz respeito à descarbonização, incluindo o **setor dos transportes**. **Na Dinamarca, o setor dos transportes, incluindo o transporte internacional, foi responsável por 44% de todas as emissões de CO<sub>2</sub> em 2019**. A queima de combustíveis fósseis em veículos e **embarcações/aviação é o principal fator das emissões, somando 67% e 31%, respetivamente**. A grande diversidade do setor dos transportes aliado à sua escala, obriga a uma solução que englobe várias medidas. A eletrificação é vista como uma medida fundamental para reduzir o consumo de energia e a emissão de GEE neste setor, considerando ainda que, no setor dos transportes dinamarquês, o **setor marítimo é responsável por mais de 75% do transporte de carga** (Silva, et al., 2022).

Os combustíveis fósseis ainda são a resposta predominante da necessidade do setor dos transportes dinamarquês (Figura 7), onde a maioria do transporte rodoviário ainda usa petróleo e diesel.

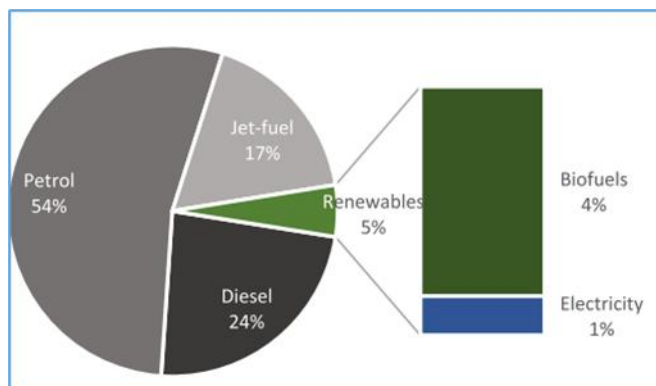


Figura 7. Percentagem dos combustíveis usados no setor dos transportes na Dinamarca em 2020.

O relatório IDAs Climate Response 2045, elaborado pela Associação Dinamarquesa de Engenheiros, traça um percurso tecnicamente viável para alcançar uma **sociedade dinamarquesa totalmente descarbonizada até 2045**. O plano assenta num uso criterioso e sustentável da bioenergia, reservando-a para setores difíceis de descarbonizar. No domínio dos transportes, o relatório destaca que o **transporte marítimo continua a ser o principal modo de movimentação internacional de mercadorias**, enquanto o transporte rodoviário permanece predominante nas deslocações internas, exigindo estratégias distintas de transição energética para cada um destes setores (Lund et al., 2021).

A figura 8 mostra como é expectável que o transporte marítimo continue a ser o principal modo de transporte de mercadorias.

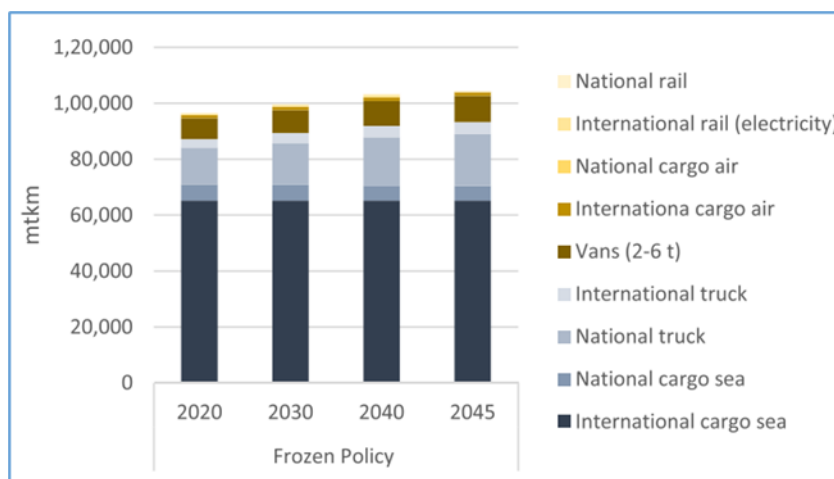


Figura 8. Evolução da procura anual de transporte de mercadorias na Dinamarca de 2020 a 2045 no cenário de "política congelada".

Para responder às necessidades do setor dos transportes que não são adequados à eletrificação, este relatório - IDAs Climate Response 2045 - propõe uma **produção significativa de electro combustíveis**. Esta alternativa, produzida a **partir de hidrogénio renovável combinado com uma fonte de carbono ou azoto na síntese de combustíveis**, permite obter hidrocarbonetos ou amoníaco sustentáveis e com alta densidade energética. Desta forma, **é possível substituir combustíveis fósseis como o jet fuel e o heavy fuel oil (HFO) utilizado no transporte marítimo**. Na figura seguinte (Figura 9), são comparados os consumos e as emissões de CO<sub>2</sub> num cenário de *Frozen Policy* com o da IDAs Climate Response.

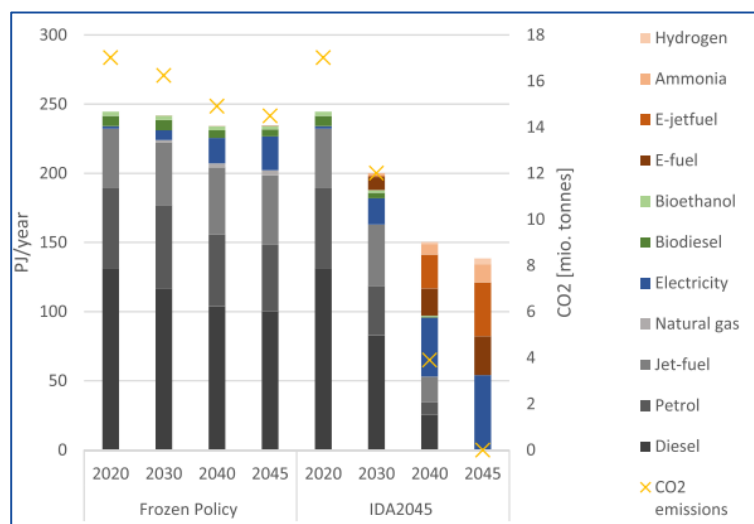


Figura 9. O consumo de combustível no sistema de transportes dinamarquês nos cenários de Frozen Policy e Climate Response 2045 da IDA. As emissões anuais de CO<sub>2</sub> são indicadas pelo "x" amarelo no eixo Y secundário.

A análise permite concluir que a política energética adotada pela Dinamarca aponta para uma **redução progressiva do consumo de combustíveis fósseis**, substituindo-os por alternativas com zero emissões de GEE. Para além da transição energética, estas medidas visam também uma **redução global do consumo de energia**, contrariando a tendência de crescimento que seria expectável num cenário de continuidade política sem ambição em matéria de descarbonização.

### 5.3 Caso de estudo – Suécia

A **Suécia é um dos países pioneiros na descarbonização do setor marítimo**, mesmo com um setor naval relativamente pequeno – a Associação de armadores suecos tem apenas 56 membros, que contam com cerca de 400 navios, dos quais cerca de 100 estão registados com bandeira sueca. Este espírito pioneiro do setor marítimo sueco reflete-se **num compromisso com a descarbonização, com navios mais ecológicos, com iniciativas de logística sustentável e ambição política**, que juntos têm ajudado a traçar um caminho em direção à descarbonização. Já em 2015, a Associação de Armadores Suecos publicou o “Roteiro Climático”, que declara de forma inequívoca a ambição de alcançar zero emissões de CO<sub>2</sub> e de outras substâncias nocivas até 2050.

A indústria marítima sueca sublinha que a descarbonização do transporte marítimo depende de **soluções ao longo de toda a cadeia logística**, e que poderá ser alcançada com tecnologias já existentes, sobretudo através da utilização de **navios tecnologicamente mais eficientes, combustíveis alternativos e outras medidas a bordo**. A Suécia está entre os primeiros países a adotar, de forma significativa, **navios movidos a Gás Natural Liquefeito (LNG), navios de abastecimento de LNG de navio para navio, navios elétricos e navios movidos a metanol**. Os armadores suecos têm liderado a adoção de navios movidos a LNG, com uma parte significativa das encomendas recentes centrada nesse tipo de propulsão. Neste caso, é dado destaque para projetos como os petroleiros da Terntank, a conversão dual fuel da Furetank, o navio de carga seca da Erik Thun AB e o ferry da Viking Lines, o maior do mundo movido a LNG e o primeiro a operar no Mar Báltico.

A **Suécia é ainda um dos primeiros países a operar navios elétricos**. Um exemplo é a ligação de ferry entre Estocolmo e Movitz, operada pela Green City Ferries. Outro exemplo recente é a ligação entre Helsingborg (Suécia) e Helsingor (Dinamarca), operada pelo grupo HH Ferries, com dois navios — o Tycho Brahe e o Aurora - começaram a operar há pouco tempo, pelo que ainda é cedo para avaliar a sua eficácia.

A Stena Line foi **pioneira na utilização de metanol como combustível marítimo**, convertendo o ferry Stena Germanica para operar com este combustível. O projeto demonstrou a **viabilidade técnica do metanol**, embora a sua viabilidade comercial dependa da disponibilidade e do custo face aos combustíveis convencionais.

A **Suécia é o primeiro** - e, até onde se sabe, o único - país **com taxas de acesso aos canais de navegação diferenciadas consoante o desempenho ambiental dos navios**. Isto significa que os navios mais limpos pagam taxas mais baixas, enquanto os navios mais poluentes pagam taxas mais elevadas. A **Suécia também lidera na descarbonização portuária**, com portos como Gotemburgo e Estocolmo entre os primeiros a **oferecer energia**

elétrica em terra para navios atracados, apoiados por isenção fiscal. Além disso, **promovem o uso de LNG com infraestruturas de abastecimento e incentivos para navios movidos a este combustível** (International Transport Forum, 2018). A Suécia adotou **uma regulação baseada em funções no setor marítimo para substituir regras excessivamente detalhadas, promovendo mais flexibilidade e inovação**. Esta abordagem define requisitos funcionais básicos e fornece orientações complementares quando necessário (Transportstyrelsen, 2017). A indústria naval sueca beneficia de **efeitos de “cluster” concentrados em Donsö, onde muitos armadores vivem e trocam conhecimentos sobre medidas a adotar**. Em alguns casos, como na Gothia Tanker Alliance, esta cooperação torna-se formal, permitindo o desenvolvimento conjunto de navios inovadores. Muitas destas soluções resultam também de parcerias com empresas e investigadores locais.

A **principal plataforma de cooperação para a descarbonização do transporte marítimo na Suécia é a Zero Vision Tool**, criada em 2011. Esta rede **reúne indústria, governo e academia, com o objetivo de promover um transporte marítimo mais seguro e sustentável**. Com cerca de 160 empresas, incluindo atores da região do Mar Báltico, esta plataforma viabilizou projetos piloto com financiamento da UE, como navios movidos a LNG ou metanol e infraestrutura de abastecimento. Além disso, outras **iniciativas suecas apoiam a transição energética no setor**, como a Haga Initiative, que reúne empresas com metas de redução de emissões, e a Fossil-Free Sweden, que **aproxima a indústria do governo ao organizar mesas-redondas e criar roteiros para setores**, incluindo o marítimo.

Para **apoiar essa transição**, podem ser criados **instrumentos financeiros favoráveis, como programas de obrigações verdes, subsídios públicos ou fundos semelhantes ao Fundo NO<sub>x</sub> norueguês**. No entanto, ainda há uma incoerência nas políticas fiscais: **combustíveis poluentes como o fuelóleo pesado não são taxados, enquanto alternativas mais limpas, como a eletricidade, enfrentam cargas fiscais** - o que trava a mudança mais efetiva e rápida para fontes mais sustentáveis.

## 5.4 Caso de estudo – Noruega

A **frota de pesca norueguesa é bastante diversa**, composta por embarcações de diferentes dimensões, idades, equipamentos e métodos de pesca (Thermes et al., 2023). Costuma ser classificada consoante a zona de operação — costeira ou de alto mar — e o tipo de arte de pesca, como arrastões ou cercadores. As embarcações costeiras eram tradicionalmente limitadas a 28 m de comprimento, mas desde 2008 essa restrição foi substituída por um limite de 500 m<sup>3</sup> de porão de carga (Directorate of Fisheries, 2021). Apesar de **representarem 95% da frota, os navios costeiros foram responsáveis por apenas 25% das emissões de CO<sub>2</sub> em 2019, enquanto os 5% da frota de alto mar geraram 75% das emissões totais** (Thompson & Thompson, 2021).

No sentido de reduzir estas emissões, o Plano Nacional de Transportes até 2029 delinea uma **estratégia climática no setor de transporte, com uma redução de emissões de 50% antes de 2030** (em relação ao atual - totalizando 8,5 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes). Isso implica reduções de 50% ou mais no setor de transporte (Fridstrøm, et al., 2019).

Na Noruega e noutros países, a **melhoria ambiental no setor marítimo tem ocorrido, até agora, principalmente através de uma melhor gestão energética e eficiência**, bem como da introdução de soluções de fim de linha, como os lavadores de gases (*marine scrubbers*). Para reduzir significativamente as emissões, **são necessárias alternativas aos combustíveis fósseis convencionais, e a descarbonização do transporte marítimo deverá envolver uma combinação de combustíveis de baixo e zero carbono** (Lindstad et al., 2021). A **Noruega definiu as suas metas de redução de emissões através da Lei da Mudança Climática (2017), que exige uma redução das emissões de GEE norueguesas entre 90% e 95%** (em relação aos níveis de 1990) até 2050. Além disso, o Plano de Ação Climática da Noruega (Meld. St. 13 (2020–2021)) aprofunda esta meta ao especificar o objetivo político de **reduzir as emissões dos setores incluídos no Sistema de Comércio de Emissões da UE (ETS) em 43% e dos setores não incluídos no ETS em 45%**, em relação aos níveis de 2005, até 2030 (Sønnervik et al., 2024).

Num estudo realizado por Steen et al., (2024), baseado em dados de um inquérito distribuído a portos públicos e privados na Noruega, a maioria dos quais de pequena dimensão, apoiado por dados qualitativos complementares obtidos através de entrevistas, análise documental e workshops, mostraram que **82% dos portos da amostra implementaram pelo menos uma medida de descarbonização**. Estes dados revelam um esforço considerável dos portos noruegueses para abordar questões energéticas e climáticas. Além disso, foi aprovada a **exigência de emissões zero para navios de cruzeiro, barcos turísticos e ferries que operem nos fiordes classificados como Património Mundial da UNESCO**, com datas de implementação faseadas entre 2026 e 2035.

A **Noruega é um dos países mais avançados na adoção de tecnologias limpas** para o setor marítimo. O país tem uma forte tradição em **promover a eletrificação e a utilização de combustíveis renováveis**. A Noruega é, de facto, pioneira na **utilização de navios elétricos**, tendo lançado o MF Ampere em 2015 - **o primeiro ferry totalmente elétrico do mundo**. O projeto resultou de uma colaboração entre a operadora Norled, o estaleiro Fjellstrand e a Siemens, com o apoio do Ministério dos Transportes da Noruega (Maritime CleanTech, 2025),

(Norled, 2025). Foi nesse ano, 2015, que o governo se comprometeu a alinhar a política climática norueguesa à da União Europeia – a ambição é uma **redução de 43% para toda a Europa até 2030** (em comparação com 2005). Com o objetivo de obter tais metas, é estimado que sejam necessárias 700 embarcações com baixas emissões, e 400 com zero emissões.

A **Associação de Armadores da Noruega**, estabeleceu os seus próprios objetivos, como apenas **encomendar navios com zero emissões a partir de 2030**, ter uma **frota completamente neutra em carbono em 2050**, e defender que sejam **proibidos combustíveis que não sejam neutros em carbono em 2050** (Norwegian Shipowners' Association, n.d).

O Plano de Ação Nacional para a Navegação Verde fornece medidas gerais e específicas para diferentes categorias de embarcações. Estas medidas estão relacionadas com a ambição **de transferir 30% do transporte de mercadorias com mais de 300 km da estrada para o mar até 2030**, e aumentar as exportações do setor marítimo. Além disso, a Noruega pretende ser uma força motriz nos esforços de redução de emissões da IMO (Norwegian Government, 2019).

Alguns exemplos de medidas incluem:

- **Incluir requisitos de baixas ou zero emissões nos processos de contratação pública** de ferries, embarcações de alta velocidade, aquacultura e offshore, quando aplicável;
- **Apoio governamental à I&D**, por exemplo, através da Enova e do Programa de Navegação Verde (Green Shipping Programme);
- **Apoio governamental à infraestrutura de fornecimento de energia a partir de terra** (OPS), pontos de carregamento e instalações de abastecimento de combustíveis alternativos;
- Consideração de uma **obrigação de quota de biocombustíveis para biodiesel avançado e biogás** no setor marítimo;
- **Aumento da taxa de imposto sobre o carbono** em 5% ao ano;
- Elaboração de um **plano nacional para o desenvolvimento portuário e/ou infraestrutura de combustíveis alternativos**.

No plano Nacional de Transportes para 2022-2033<sup>1</sup>, foram reservados 33 mil milhões de coroas norueguesas para a gestão costeira, e 3 mil milhões para projetos com **colaboração público-privada** que envolvam atores de vários setores com vista a soluções de transporte mais sustentáveis. Mesmo com o cenário atual, a Noruega consegue posicionar-se na linha da frente para uma descarbonização efetiva da frota, sendo um exemplo a seguir por outros países. Além disso, **Governos como o da Noruega também aplicam taxas às emissões de NOx por embarcações a operar nas águas da Noruega**. O valor ganho serve para **financiar projetos inovadores** que visem a **redução de emissões**, tanto para embarcações com a bandeira da Noruega, como embarcações que operem nas suas águas.

## 5.5 Caso de estudo – WATERCRAFT INDEPENDENCE

O navio Watercraft Independence foi objeto de uma avaliação ESG detalhada (informação disponibilizada livremente na internet pela Idwal), integrando a vertente ambiental numa inspeção geral realizada no porto de Barranquilla, Colômbia.

Esta análise representa uma abordagem inovadora ao avaliar o desempenho de sustentabilidade a nível da unidade operacional — o próprio navio — e não apenas ao nível corporativo, oferecendo uma perspetiva prática sobre a implementação de estratégias ESG no setor marítimo.

Embora a classificação ambiental global atribuída tenha sido "razoável" (fair), o Watercraft Independence destacou-se pela **implementação de um conjunto de boas práticas relevantes no domínio da descarbonização**, nomeadamente:

- Adoção de políticas específicas para redução do impacto ambiental, com destaque para o **ensaio de combustíveis alternativos e a redução da carga da maquinaria quando em porto**, contribuindo diretamente para a **diminuição das emissões de gases com efeito de estufa**;
- Existência de um **plano de resposta ambiental rápido em terra, evidenciando capacidade de mitigação em caso de incidentes**;

---

<sup>1</sup> Regjeringen website | <https://www.regjeringen.no/en/dokumenter/national-transport-plan-2022-2033/id2863430/?ch=1>

- **Cumprimento integral das normas IMO 2020**, assegurado através da utilização de combustíveis com baixo teor de enxofre, como VLSFO, MGO e DO;
- Aplicação de **revestimento anti incrustante e livre de compostos organoestânicos, reduzindo a poluição marinha e o risco de proliferação de espécies invasoras**;
- **Conformidade com os requisitos do EEXI**, sem necessidade de instalação de tecnologias adicionais para esse efeito;
- Utilização de **serviços de roteamento meteorológico** (weather routing), **otimizando o consumo de combustível durante a navegação**;
- **Integração de dispositivos de poupança energética**, como limitadores de potência dos motores (Engine Power Limiter) e sistemas de controlo por inversores para bombas e ventiladores.

Apesar de apresentar um índice CII de 7.48 para 2021, enquadrando-se na banda E — o que reflete uma margem considerável para melhoria — o navio constitui um **exemplo útil de transição em curso**, com várias iniciativas já em implementação e potencial para uma evolução futura. A ausência de certificações ambientais adicionais (green notations) e de sistemas voluntários de reciclagem a bordo foram identificadas como áreas a desenvolver.

Assim, o Watercraft Independence representa um caso prático de como **navios convencionais podem iniciar um percurso de melhoria contínua rumo à descarbonização**, evidenciando o papel central das medidas operacionais, tecnológicas e organizacionais no caminho para uma embarcação, e uma frota, mais sustentável.

## 6 Tecnologias Para a Descarbonização da Frota

Relativamente ao consumo de combustível, os dados reportados através do Regulamento de Monitorização, Relato e Verificação (MRV) da UE, mostram alterações na utilização de diferentes tipos de combustível utilizados, como apresentado na figura seguinte (Fig.10).

**Desde 2020, a utilização de petróleo pesado (HFO) diminuiu**, enquanto o **consumo de petróleo leve (LFO) aumentou**. Todos os navios abrangidos pelo regulamento MRV **consumiram aproximadamente 43,7 milhões de toneladas de combustível em 2022, um aumento de 7,2% em comparação com 2021** (40 milhões de toneladas).

Dentro das metas do European Green Deal, a **UE comprometeu-se a ser neutra em carbono até 2050, com um objetivo intermédio de redução de 55% das emissões até 2030**.

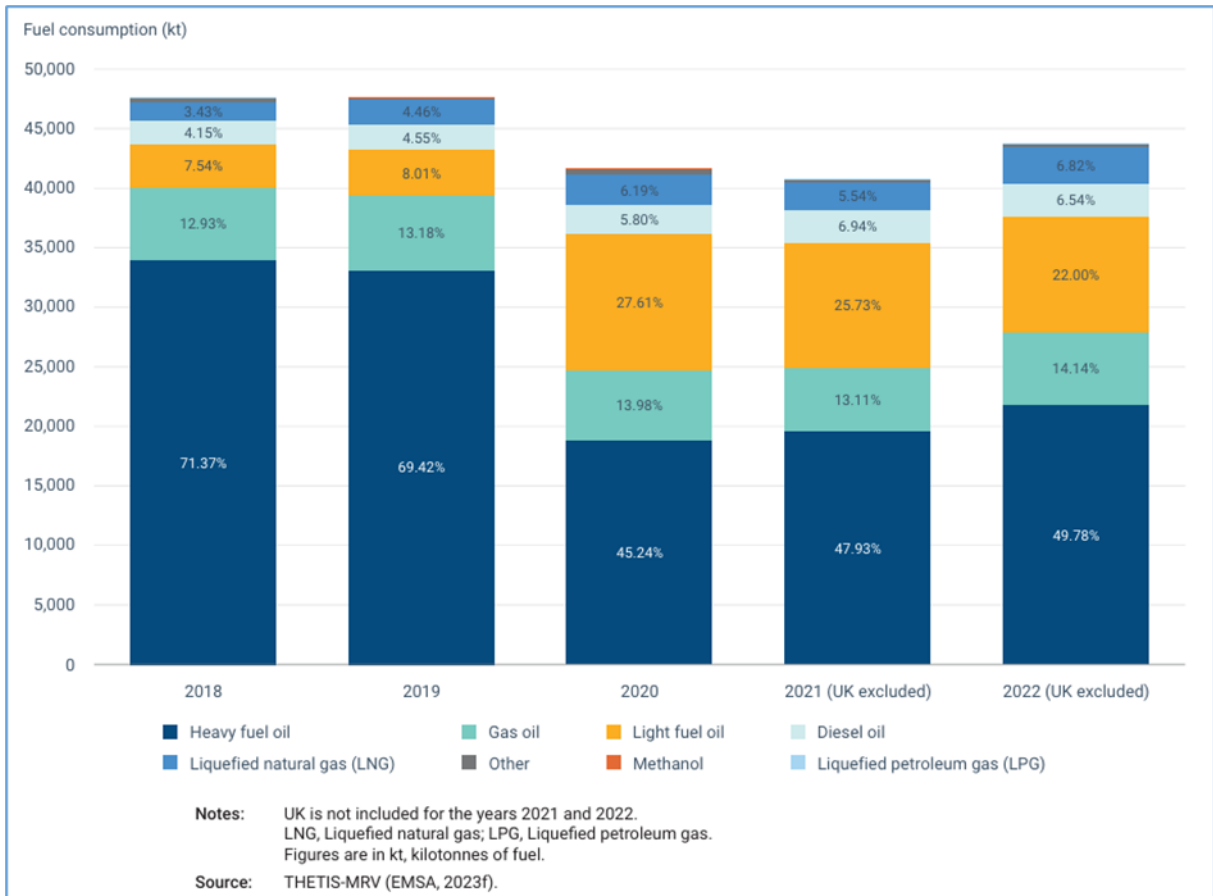


Figura 10. Consumo total de combustível da frota EU MRV de 2018 a 2021 e consumo por tipo de combustível entre 2018 e 2022. Fonte: EMSA, 2023.

De acordo com o relatório Industry Transition Strategy do Mærsk Mc-Kinney Møller Centre for Zero Carbon Shipping, a **amônia pode vir a ser a resposta central da procura energética global da indústria marítima para uma transição para a neutralidade carbônica**. A presença de amônia nas alternativas de combustíveis prevista para 2032 é de aproximadamente 16%, podendo subir para metade (50%) em 2050 (Fig. 11).

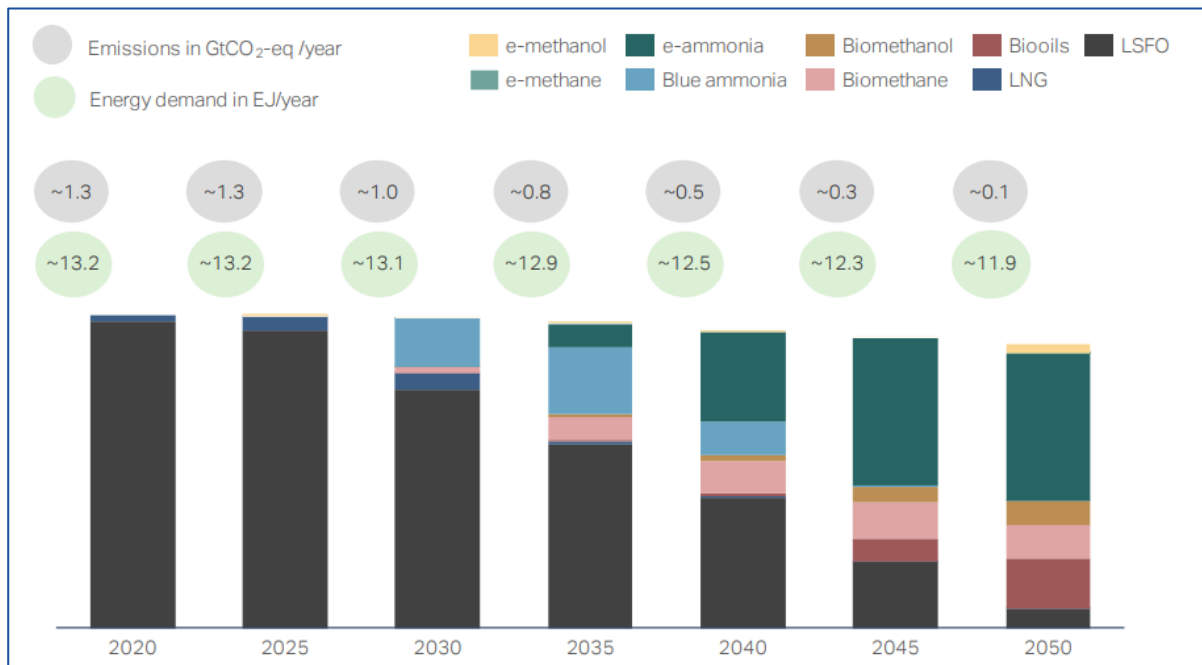


Figura 11. Procura total de energia e consumo de combustível numa trajetória rumo às zero emissões. Fonte: Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Ship, 2021.

A DNV (Det Norske Veritas), no seu relatório *Energy Transition Outlook 2019: Maritime Forecast to 2050*, sugere que a **Organização Marítima Internacional poderá definir metas de redução de emissões através de inovações no design, utilizando a amónia como combustível alternativo**. Segundo esta avaliação, a utilização comercial generalizada da amónia como combustível teria início em 2037, para passar a ser a principal escolha de combustível para novos navios em 2042, e representaria 25% do *mix* de combustíveis marítimos até 2050. Os navios movidos a amónia representariam quase 100% dos novos navios (em termos de consumo de combustível) a partir de 2044. Com esta transição, a procura adicional estimada para a produção sustentável de amónia seria, até 2050, de aproximadamente 120 milhões de toneladas por ano.

Relativamente à evolução das emissões de CO<sub>2</sub> no setor marítimo, na Figura 12, é possível ver essas emissões, divididas por tipo de navio, no período entre janeiro de 2012 e março de 2025. Os valores são apresentados como toneladas de CO<sub>2</sub> anualizadas mensalmente, ou seja, correspondem a uma projeção de emissões anuais baseada nos dados de cada mês. Observa-se um aumento gradual das emissões totais ao longo do período. Os navios porta-contentores ("*Container*"), graneleiros e cargueiros gerais ("*Bulk & GC*") e petroleiros ("*Tankers*") são responsáveis pela maior parte das emissões registadas. Outras categorias, como os navios de passageiros, veículos e offshore, representam parcelas menores, mas, ainda assim, significativas. Esta distribuição destaca a necessidade de políticas específicas para os segmentos com maior contribuição para as emissões, de forma a alcançar metas de descarbonização para o setor.

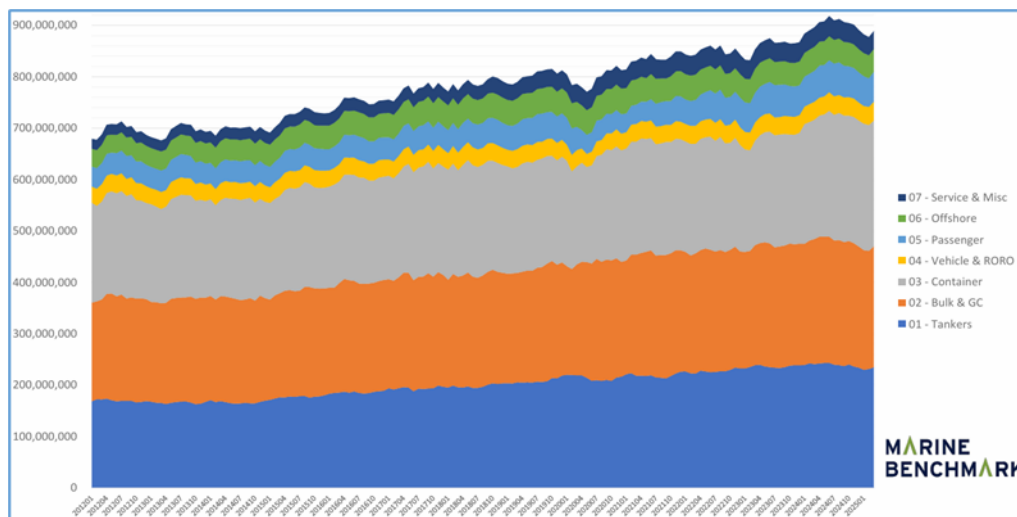


Figura 12. Evolução das emissões anuais de CO<sub>2</sub> por tipo de navio, entre janeiro de 2012 e março de 2025.  
Fonte: MARINE BENCHMARK.

## 6.1 Combustíveis alternativos

Existem vários exemplos, e casos de boas práticas de descarbonização do setor do transporte marítimo, que podem e devem servir para uma análise que nos faça perceber os seus métodos e aprender com esse sucesso. O grande interesse dos **armadores suecos na descarbonização foi, e é, muito alimentado por grandes empresas suecas de energia, que fomentam parcerias com empresas de navegação**. Este compromisso de certas transportadoras com navios novos de baixas emissões é considerado um dos fatores determinantes para o avanço da Suécia neste campo. Nestes países mais avançados na descarbonização da frota, uma parte do progresso é explicada pela **cooperação entre stakeholders através de financiamento e regulação**, bem como pela **criação de plataformas onde se reúnem os esforços da indústria marítima, governação e comunidade académica**.

Para garantir a oferta e a possibilidade de novos combustíveis, vários projetos tiveram início para dar resposta a esses novos modelos de negócio e às necessidades de um mercado em crescimento. As empresas de transporte marítimo exploram atualmente alguns combustíveis como potenciais alternativas, tais como: **biodiesel, e-metanol, bio-metanol, amónia, hidrogénio, gás natural liquefeito (LNG) e nuclear**.

Segundo a International Chamber of Shipping, atualmente **20% dos navios utilizam combustíveis alternativos como LNG, Hidrogénio ou baterias e emitem metade do CO<sub>2</sub> do transporte ferroviário**. No entanto, de acordo com o Center for Zero Carbon Shipping, os **combustíveis alternativos têm uma menor densidade energética** e, por isso, precisam de mais espaço destinado ao armazenamento.

A informação apresentada a seguir, relativa às características dos diferentes combustíveis alternativos, baseia-se principalmente no Relatório Ambiental do Transporte Marítimo Europeu de 2025 e em estudos complementares conduzidos pela mesma agência sobre combustíveis sintéticos, amónia, hidrogénio, eletricidade, biocombustíveis e energia nuclear.

### 6.1.1 Amónia

A **Amónia (NH<sub>3</sub>) é um dos mais promissores combustíveis alternativos**, sobretudo para **navios de carga de longo curso**, apesar de haver preocupações quanto à sua **toxicidade, corrosividade e inflamabilidade**. Esta alternativa é relativamente **fácil de introduzir no mercado**, e oferece uma **solução muito próxima do carbono zero**. É importante realçar que a Amónia já é uma **substância comumente utilizada no transporte marítimo**, como carga. Todas as **manobras de segurança**, incluindo procedimentos operacionais e de segurança, **são bem conhecidas**, para além de que a produção de amónia está assente em **tecnologias bem conhecidas e estabelecidas**. No entanto, a utilização de amónia como combustível vai adicionar riscos que precisam de ser conhecidos e trabalhados com **regulamentação nova a ser desenvolvida**, incluindo treino especializado e equipamento.

Alguns dos benefícios da utilização da amónia é a **possibilidade de a armazenar em forma líquida à pressão atmosférica**, ocupando um volume menor do que o volume necessário para o hidrogénio. Adicionalmente, **não são necessárias as temperaturas criogénicas** como para o LNG e para o hidrogénio. Esta **facilidade no transporte e armazenamento** faz da amónia um bom candidato a combustível alternativo.

Não obstante, a sua utilização implica **emissões de NO<sub>x</sub>**, o que exige a **adoção de tecnologias de pós tratamento**. Além disso, as **emissões de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)** resultantes da combustão são significativas, o que coloca em questão os benefícios globais previamente mencionados. O problema torna-se mais complexo, pois os **sistemas de pós-tratamento para controlo de NO<sub>x</sub> também emitem N<sub>2</sub>O** devido a reações secundárias nas unidades catalíticas. Ao contrário das emissões de NO<sub>x</sub>, para as quais já existem sistemas de pós-tratamento comerciais amplamente disponíveis, o **N<sub>2</sub>O é mais difícil de converter**. Além disso, os efeitos prejudiciais do "ammonia slip" resultante da combustão incompleta no motor e do processo catalítico nas unidades SCR - Redução catalítica seletiva - devem ser considerados. Essa preocupação deve ser abordada ao longo de toda a cadeia de abastecimento, pois qualquer **fuga ou derramamento pode causar problemas como eutrofização, acidificação e emissões de GEE**. Estima-se que a libertação de apenas 0,4% do azoto contido na amónia sob a forma de N<sub>2</sub>O anule os benefícios da sua utilização. Apesar da **combustão da amónia não provocar a emissão de CO<sub>2</sub>**, a sua **produção emite**, uma vez que é produzida, predominantemente, através do gás natural e do carvão.

Dentro de todas as preocupações já levantadas surge, também, a necessidade de desenvolvimento de **sistemas de absorção de amónia para eliminar todas as descargas de amónia na atmosfera** durante operações normais ou de emergência; esses sistemas serão novos para a navegação e vai exigir mais estudos e desenvolvimento. Deve-se considerar também o nível de toxicidade da amónia para a vida marinha, que vai exigir planos de **prevenção de derramamento** desta substância na água.

Por estas razões, a utilização de amónia como combustível deve ter garantidos 2 elementos:

- **Usar amónia verde**, que abre desafios na produção, sustentabilidade e viabilidade económica;
- **Requisitos específicos de segurança e treino para os operadores.**

Nesse sentido, os sistemas de **produção para a amónia verde** passam por:

- processo de síntese Haber-Bosch, onde o abastecimento de hidrogénio proveniente de gás natural é substituído por um processo de eletrólise (mais usado)
- energia solar direta (em substituição da energia usada na eletrolise convencional)
- produção de hidrogénio biogénico
- síntese de plasma não térmico (processo inovador)
- síntese eletroquímica de amoníaco, que não requer uma etapa separada de produção de hidrogénio.

Atualmente, existe uma **grande lacuna de prontidão tecnológica** entre os processos estabelecidos baseados nos princípios de Haber-Bosch e os outros, sugerindo que o processo Haber-Bosch dominará pelo menos o futuro a curto prazo para a produção de amoníaco. Este método, que tem por base o uso do carvão e do gás natural, é responsável pela produção mundial de Amónia, que foi, em 2023, cerca de 235 megatoneladas. **A produção verde da Amónia pode reduzir a emissão de GEE em cerca de 91%**, numa análise well-to-wake, bem como **outros gases como SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, metais pesados, matéria particulada, ou Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (HAPs)**, que são reduzidos substancialmente, por vezes até zero. Com os olhos postos na amónia como um combustível alternativo, surge o desafio de **umentar a produção de amónia verde**, que por sua vez vai requerer um **aumento na produção de energia verde – energia renovável**. No entanto, a produção de energia verde vai ter competição por parte de outras indústrias como a automóvel, aviação, construção, entre outros.

Para a implementação deste tipo de combustível nas embarcações, é importante **considerar os custos de aquisição e manutenção para os armadores**. Segundo um estudo da European Maritime Safety Agency (2023), **em 2030 é esperado que as embarcações movidas a amónia verde sejam 2.5 a 3 vezes mais caras, e 1.5 vezes mais caras para a amónia azul, do que para os combustíveis convencionais**. Segundo o Center for Zero Carbon Shipping (2024), **o custo total adicional de construção nova e conversão para navios novos ou convertidos para amónia varia entre 25% e 42% do custo de uma construção nova padrão a fuelóleo**. Como a utilização de combustíveis alternativos como a **amónia exige espaço extra para armazenar** mais combustível (por serem menos densos energeticamente), manter o alcance de navegação num navio VLCC (Very Large Crude Carrier) **normalmente não compensa economicamente, porque reduz a capacidade de carga**. Se o objetivo for **usar amónia logo após a construção do navio (dentro de 1,5 anos)**, então faz sentido **investir diretamente numa construção nova com motor dual-fuel e alcance total**. No entanto, se for aceitável que o **navio tenha**

**um alcance menor, construir um dual-fuel pode ser vantajoso mesmo que só comece a operar com o novo combustível entre 4 e 6 anos após a construção** - dependendo do tipo de combustível.

Quando se opta por **construir o navio preparado para uma conversão futura** (em vez de ser já dual-fuel), o grau de preparação pode representar um **custo adicional de cerca de 1 a 6% em relação ao custo de um navio novo a fuelóleo, ou de 5 a 7% no caso de um navio novo a LNG**. Tal como acontece com o modelo LR2 (embarcação usada como exemplo no estudo mencionado), essa diferença de custo é maior no caso dos navios a LNG porque os tanques e sistemas usados não servem para amônia — esses tanques têm de ser instalados mais tarde, durante a conversão.

Contudo, **espera-se que até 2050 a diferença entre custos de embarcações a combustíveis fósseis – amônia seja menor**, devido a uma **redução dos custos de produção desta, e ao aumento dos preços dos combustíveis fósseis**. Ambas as opções estão muito **dependentes de políticas internacionais e nacionais**, bem como da **flexibilidade do mercado**. Outra questão ao nível operacional e económico, é que o novo projeto de navio que incorpora amônia - com **baixo poder calorífico** - **pode levar a uma redução na autonomia das embarcações**, aumentando o número de paragens em portos e o número de interações, ou então os navios serão maiores, ocupando mais espaço no cais. Isso poderia resultar num **aumento do tráfego em zonas portuárias**.

Em termos de regulamentos e legislação, é preciso **ir mais longe do que apenas políticas de redução de GEE**. Neste caso em particular, há **falta de legislação a nível nacional e internacional relativamente à utilização de amônia como combustível**, o que é, para já, um impedimento à expansão da sua utilização. Para esse efeito, algumas organizações reconhecidas tentaram, recentemente, **introduzir regras e guias para apoiar a adoção de Amônia como combustível para embarcações**, tais como:

- **Rever o Código IGC** para produzir maior **harmonização com o Código IGF** e considerar emendas para permitir a combustão de cargas tóxicas de amônia.
- Apoiar o **desenvolvimento de diretrizes provisórias** para o uso de amônia como combustível marítimo.
- **Emendas ao Anexo VI e ao Código Técnico NOx para permitir a aprovação e certificação ao EEDI, EEXI e regulamentos NOx**, juntamente com o desenvolvimento de emendas aos regulamentos 14 e 18 do Anexo VI.
- **Considerar novas emendas ao Anexo VI e ao Código Técnico NOx** para introduzir limites para NH<sub>3</sub> e N<sub>2</sub>O de motores de combustão interna.
- **Atribuir à ISO o desenvolvimento de um padrão de combustível marítimo** de amônia e outros padrões relevantes para acoplamentos e abastecimento.
- **Desenvolver ainda mais Requisitos Unificados pela IACS** para máquinas e equipamentos, recomendações para orientação de avaliação de riscos sob o Código IGF e abastecimento de amônia; essas medidas reduziram a incerteza na indústria e apoiariam a aplicação harmonizada de requisitos para a amônia como combustível marítimo.
- **Estabelecer mecanismos de certificação internacional** para garantir que a produção de amônia verde seja realmente 'verde'; esses são necessários para incentivar a adoção de combustíveis verdes. Isso também requer a introdução de padrões e diretrizes para o cálculo, relatório e verificação de fatores de emissão para diferentes combustíveis.

No estudo feito pela European Maritime Safety Agency (2023) foram realizadas várias avaliações de risco para diferentes navios movidos a amoníaco. O estudo incluiu um navio RO-PAX, um VLCC e um graneleiro. Estas avaliações confirmaram que as **principais preocupações associadas à utilização da Amônia como combustível marítimo estão relacionadas com a segurança e a toxicidade**.

Em suma, é possível concluir que a utilização da amônia como combustível pode ser uma alternativa. No entanto, é necessário desbloquear algumas barreiras, como **expandir o uso de energias renováveis e melhorar a eficiência das tecnologias; Promover políticas de descarbonização;**

**Desenvolver legislação internacional ao nível da IMO** para o uso de **amônia como combustível; encorajar a cooperação entre stakeholders** para responder soa **problemas tecnológicos e de segurança;** e **aumentar o conhecimento sobre os riscos e os desafios ao nível da segurança** do uso de amônia como combustível, e como os mitigar.

### 6.1.2 Biocombustíveis

Os **biocombustíveis** apresentam-se como uma alternativa viável para a descarbonização da frota uma vez que, devido às suas características, **não requerem mudanças significativas nos motores, tanques e sistemas de abastecimento da frota atual**. Num estágio inicial, é possível ainda **intercalar o uso deste tipo de combustível com os combustíveis fósseis – cenário ideal para uma fase inicial da descarbonização**. Esta característica é talvez a que mais se destaca de entre os outros combustíveis alternativos, uma vez que podem, **mais rápido** do que os outros, contribuir para a descarbonização. Isto significa que **alternativas bio podem já substituir os combustíveis convencionais**. A classificação dos biocombustíveis em relação ao seu potencial como alternativa viável para o setor marítimo, pode ser avaliado através das cadeias de produção, TRL - *Technology Readiness Level*, **sustentabilidade, disponibilidade da matéria-prima, adequação e tendências de custo**, havendo as seguintes opções:

- Óleo vegetal hidratado (HVO) proveniente de gorduras e óleos usados (FOGs) e o biometano proveniente da digestão de resíduos;
- Diesel FT (Fischer-Tropsch), biometano (obtido por biomassa lignocelulósica) e FAME - Fatty Acid Methyl Esters vindos das gorduras de óleos usados (FOGs);
- Bio metanol de biomassa lignocelulósica;
- Dimethyl ether (DME) vindo de biomassa lignocelulósica;

O benefício da utilização dos biocombustíveis na **qualidade do ar pode variar** dependendo das matérias-primas utilizadas. Numa análise *well-to-wake*, a utilização de **biomassa lignocelulósica apresenta-se como a melhor solução, no que respeita às emissões de CO<sub>2</sub>**. Contudo, uma vez que há uma grande procura desta matéria-prima por vários setores, é importante que a sua produção tenha em **consideração aspetos de conservação e preocupações com a biodiversidade**.

O **diesel Fischer-Tropsch e o DME**, apesar de poderem ser consideradas alternativas, **apresentam alguns problemas como:**

- A **produção do diesel Fischer-Tropsch produzido de fontes bio é muito baixa**, sendo a maior parte produzida através do processo *gas-to-liquid*. No entanto há poucos dados publicados, o que vai **requerer mais estudos para perceber o potencial deste combustível**.
- A produção de DME atingiu um bom grau de maturidade, mas **não tem feitos progressos no transporte marítimo**. Apresenta reduções na emissão de CO<sub>2</sub>, mas em percentagens de mistura muito baixas. Caso se aumente essa percentagem, já são necessários sistemas próprios de armazenamento de gás, e procedimentos especiais de segurança, não sendo por isso um combustível substituto para as instalações convencionais de combustível. Considerando as alterações necessárias, é mais rentável outros combustíveis alternativos como o metanol – já estão em desenvolvimento.
- Muitas das embarcações movidos a GPL - Gases de petróleo liquefeito podem funcionar com DME, apesar de serem muito poucos, o que vai reduzir o potencial desta alternativa.

O biometano e o biometanol são substitutos diretos do LNG e do metanol, respetivamente. Contudo, o **biometanol pode ser uma melhor alternativa do ponto de vista da sustentabilidade**, e o biometano já que está num estágio de produção mais consolidado – ambos apresentam **desafios quanto aos custos até 2030**.

Algumas notícias recentes sobre navios movidos a biometano parecem corroborar esta análise, enquanto a indústria também sinalizou o potencial da frota atual movida a LNG fazer a transição para o biometano. No entanto, o **fornecimento de biometano para o setor marítimo enfrenta forte concorrência de outros setores**, uma vez que pode ser injetado diretamente em sistemas locais de aquecimento (comerciais e residenciais), bem como na rede local de gás para substituir o gás natural.

Os resultados de um estudo comparativo, realizado pela EMSA em 2023, analisou 3 grupos de navios - porta-contentores, graneleiros e petroleiros - mostraram que as **embarcações movidas a biocombustíveis não seriam competitivas com os que operam com os combustíveis convencionais**.

Neste sentido, prevê-se que o custo seja mais alto para embarcações movidas com FAME, biometano e biometanol, em comparação com as movidas a VLSFO - Low Sulphur Fuel Oil. Para HVO e FT os custos são similares quando comparados com o óleo de combustível – dependendo do valor deste. **Muitas alternativas apresentam custos reduzidos a partir de 2030, com reduções de 20-45% do custo anual em 2050, exceto o biometano**. Os custos associados à modernização dos navios e à logística implicada nas transformações das próprias embarcações, pode levar a que estas **embarcações adaptadas não consigam competir com navios novos**. Acresce ainda o facto de se esperar uma maior procura, e daí **escassez de biomassa**, que pode levar ao

aumento do preço dos biocombustíveis no futuro. Ou, em alternativa, a **biomassa ser obtida através de técnicas não sustentáveis**, que ainda que diminua os preços dos biocombustíveis, terá um grande impacto na biodiversidade e recursos naturais.

Na parte da regulamentação, há algumas recomendações que devem ser consideradas:

- Uma **atualização da norma ISO 8217** sobre combustíveis marítimos para permitir misturas de FAME superiores a 7% (atualmente estabelecidos)
- **Finalizar e publicar a norma ISO/AWI 6583** sobre o metanol como combustível marinho, para apoiar o uso do metanol renovável
- Embora a atual ausência de regulamentação no Código IGF para óleos combustíveis com ponto de inflamação entre 52°C e 60°C não seja vista como a barreira significativa à adoção dos biocombustíveis, há uma **falta de diretrizes neste assunto por parte da IMO**.
- As **reduções adicionais nos limites de teor de enxofre dos combustíveis**, conforme definidos pelo Regulamento 14 da IMO, trariam benefícios significativos para a qualidade do ar, podendo também incentivar o uso de biocombustíveis naturalmente baixos em enxofre
- A **incerteza relativamente à aplicação do Regulamento 18.3.2.2 do Anexo VI** (relativo a motores que excedem os limites de emissões de NOx do Regulamento 13 quando consomem combustíveis produzidos por métodos que não a refinação de petróleo) continua a ser uma barreira importante à sua adoção generalizada. Embora exista uma solução alternativa através da aplicação do Regulamento 3.2 para testes a bordo, ou do Regulamento 4 para “equivalências”, há uma necessidade urgente de atualizar o Anexo VI e o Código Técnico NOx para clarificar e harmonizar a aplicação de biocombustíveis;
- Considerando os desafios no desenvolvimento e implementação de alterações regulamentares de forma atempada, os intervenientes da indústria, como a IACS, podem **facilitar a adoção e aplicação harmonizada de biocombustíveis através do desenvolvimento de Requisitos Unificados, Interpretações Unificadas e Recomendações** - algo que deve ser incentivado.
- **Apoiar o desenvolvimento de boas práticas** sobre o manuseamento dos biocombustíveis, especialmente no abastecimento e transferências, bem como o desenvolvimento de designs e orientações operacionais por parte dos fabricantes de motores

Os estudos HAZID feitos pela EMSA, 2023, não identificaram **nenhum problema que impossibilitasse o desenvolvimento de biocombustíveis como HVO (e FT Diesel), FAME e misturas DME**. No entanto, é necessário acompanhar o uso destes em bombas, tanques e motores, para garantir que eventuais desgastes de componentes sejam detetados e corrigidos o mais cedo possível. Um dos problemas já identificados tem que ver com o **elevado teor ácido de alguns biocombustíveis**, que podem provocar corrosão no sistema de combustível, mas esta questão é relativamente fácil de mitigar através da escolha de materiais compatíveis com esse nível de acidez. O **armazenamento prolongado de alguns biocombustíveis** pode levar também ao **crescimento de bactérias e fungos, bem como à coagulação nos tanques de combustível**, o que pode causar corrosão e entupimento de filtros. Estas questões podem ser resolvidas com reabastecimentos (*bunkering*) mais frequentes ou com a aplicação de novos revestimentos nos tanques que impeçam o desenvolvimento bacteriano. Por último, viu-se que o **desempenho de alguns motores pode ser ligeiramente afetado com o uso de biocombustíveis**. Este problema pode ser resolvido através de testes adicionais para otimizações dos motores.

Neste momento, os FOGs dominam os biocombustíveis que são usados como combustíveis marinhos. Contudo, existem algumas preocupações em como garantir a disponibilidade destes num volume que permita que sejam usados como matéria-prima independente para responder às necessidades de HVO e FAME.

Apesar de todos os pontos a favor, o aumento da procura por este tipo de combustível pode **aumentar os preços** e tornar esta **opção menos viável**, pela **indisponibilidade de biomassa** e capacidade de ampliar a produção necessária. Para mitigar riscos relacionados ao uso excessivo de terras e desflorestação, o regulamento FuelEU proíbe biocombustíveis à base de culturas alimentares, promovendo **biocombustíveis à base de resíduos**.

Dos biocombustíveis, os que se apresentam como mais viáveis incluem o **biometano, diesel Fischer-Tropsch, biometano a partir da digestão de resíduos e éster dimetilico**. O FAME (ésteres metílicos de ácidos gordos) de gorduras, óleos ou gorduras e o biometano por gaseificação também podem ser opções adequadas.

Em conclusão, os biocombustíveis podem ser usados como uma opção viável para apoiar a descarbonização, principalmente por **não serem necessárias adaptações significativas**, para além de que grande parte destes **biocombustíveis estarem atualmente disponíveis**, ainda que não em quantidades suficientes. A legislação ainda que deva ser atualizada, muita da que existe pode ser aplicada aos biocombustíveis, devido à sua aparência com os combustíveis fósseis. No entanto, também há barreiras à adoção mais ampla dos biocombustíveis, como o preço destes, que se espera que seja brevemente ultrapassável com as medidas a ser tomadas pela UE e pela

IMO. Uma outra grande barreira à adoção de biocombustíveis é a **falta de normas internacionais harmonizadas** sobre critérios de sustentabilidade. Existem várias formas de produzir biocombustíveis, e algumas podem ser mais prejudiciais ao ambiente do que os combustíveis fósseis. Como diversos setores competem pelo mesmo recurso, é essencial alinhar as diretrizes marítimas em discussão na IMO com as de outras indústrias, garantindo uma abordagem coerente e justa para todos. Embora esta alternativa seja considerada uma opção viável para o transporte marítimo de longo curso, a sua disponibilidade limitada (e regional) pode torná-la **especialmente adequada** para ocasiões com menor consumo de combustível, como o **transporte marítimo de curta distância**, embarcações de pesca, navios de apoio à produção de energia offshore, entre outros.

### 6.1.3. Gás Natural Liquefeito

O Gás Natural Liquefeito (LNG) é atualmente um dos combustíveis alternativos que mais se destaca para uso prático, podendo oferecer uma **redução de cerca de 30% nas emissões de CO<sub>2</sub>** (Kondratenko et al. 2025), e apresentando valores competitivos em comparação com outras opções de baixo carbono. Devido a estes benefícios, em 2017 já havia 120 navios a funcionar comercialmente. Em 2015 o valor de **novas construções com capacidade para LNG era 5%, valor que subiu para 13% em 2018**.

Os armadores suecos têm sido pioneiros na introdução de embarcações movidas a LNG. Através do uso **deste novo combustível, registaram-se descidas de 83-96% de SO<sub>2</sub>, 79-91% de NO<sub>x</sub>, 80-84% para PM e 23-24% nas emissões de CO<sub>2</sub>**. Dois portos suecos já estão também equipados com a possibilidade de abastecer embarcações movidas a LNG, e um armador sueco – Sirius – tem sido pioneiro no uso de navios para abastecimento de outros navios movidos ao mesmo combustível – LNG (EMSA, 2018).

Apesar de todos os benefícios apresentados pelo LNG, as **emissões de metano que podem ocorrer, tanto na produção do combustível, como durante a combustão nos motores**, pode comprometer significativamente estes benefícios. Estas emissões variam bastante consoante o tipo de motor e as rotas das cadeias de abastecimento (Balcombe et al., 2021). O **metano é um gás com um elevado efeito de estufa** (120 vezes mais forte que o CO<sub>2</sub>), mas apresenta um tempo de vida relativamente curto -12 anos – enquanto o CO<sub>2</sub> pode ficar na atmosfera centenas de anos. As **emissões de metano poderiam ser reduzidas em navios com emissões mais elevadas através do controlo operacional, do design do motor, pós-tratamento e controlo operacional**. Combinando uma redução das emissões na cadeia de abastecimento com uma redução das emissões do motor, as emissões totais poderiam ser limitadas a menos de 0,5% (Balcombe et al., 2021). Com **metas de redução de GEE cada vez mais ambiciosas, os navios movidos a LNG podem vir a alcançar reduções de emissões superiores a 30% em comparação com o HFO**. De forma semelhante, as **emissões de CO<sub>2</sub> também poderão ser reduzidas ainda mais na cadeia de abastecimento, particularmente no processo de liquefação**. A liquefação é um processo com elevado consumo energético, em que o combustível utilizado é tipicamente uma fração do próprio gás. Isto resulta em emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da combustão, mas estas emissões são agravadas por unidade de energia fornecida, dado que cerca de 10% do gás entregue é consumido como combustível durante a liquefação. Se o combustível utilizado fosse derivado de uma **fonte alternativa com menor intensidade carbónica**, estas emissões poderiam ser limitadas.

As embarcações movidas a LNG conseguem reduzir os impactos ambientais para a maioria das métricas de qualidade do ar, no entanto ainda há **motores a LNG que emitem metano**. De forma a garantir um benefício efetivo face a outras alternativas de combustíveis, as **emissões de metano devem ser reduzidas a 0.8%-1.6% em toda a cadeia de abastecimento**, através de técnicas de deteção e remediação eficazes.

Os **motores a LNG não conseguem atingir a meta de redução de 50% das emissões de gases de efeito estufa da indústria sem melhorias adicionais**. Essas melhorias passam pela redução das emissões de metano, do aumento da eficiência dos motores e do aumento da eficiência geral dos navios. As emissões totais de metano poderiam ser limitadas a menos de 0,5%, as eficiências dos motores poderiam ser melhoradas, e há um potencial para medidas de eficiência dos navios relacionadas à recuperação de calor residual, navegação lenta e design do casco. No caso desta alternativa não proporcionar as reduções de emissões exigidas pela estratégia inicial de GEE da IMO, e que a sua utilização pode até agravar os impactos climáticos do transporte marítimo, é **legítimo questionar os investimentos contínuos em infraestruturas de LNG**, tanto a bordo dos navios como em terra, pois estes podem dificultar a transição para combustíveis de baixo ou zero carbono no futuro.

Por último, é importante reconhecer que existem **poucas medições e dados fiáveis e transparentes das emissões de metano de motores a LNG e do transporte de LNG**. Neste sentido, para que o LNG possa desempenhar um papel significativo no setor naval, as emissões de metano devem ser reconhecidas, compreendidas e sistematicamente reduzidas através de inovação tecnológica e práticas mais eficazes de operação e manutenção

#### 6.1.4. Eletricidade

O uso de **eletricidade** como principal fonte de energia para a propulsão de embarcações é, em comparação com os sistemas tradicionais – motores de combustão -, **mais eficiente e com um menor impacto ambiental**. Uma embarcação movida à base de um sistema elétrico, é composta essencialmente por uma fonte de energia, conversores de energia, motores, dispositivos de propulsão e equipamentos auxiliares. Um sistema totalmente elétrico, seria alimentado por baterias

Com o aumento da utilização das alternativas sustentáveis, a solução baseada em energia armazenada em baterias tem crescido. A eletrificação tem vantagens como a **redução da emissão dos GEE, mas também no design e nas operações, ao diminuir a necessidade de manutenção e permitir uma maior flexibilidade nos arranjos dos sistemas de propulsão a bordo**. As instalações de Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) tem vindo a aumentar em embarcações. Este sistema consiste numa instalação que converte, de forma reversível, energia química em outras formas de energia e, inversamente, armazena internamente energia em baterias recarregáveis sob a forma de energia química. Segundo a Alternative Fuels Insight, **existem atualmente mais de 800 navios com baterias em operação** — um número que mais do que triplicou nos últimos cinco anos. Destes, **cerca de 60% operam na Europa**, utilizando baterias a bordo para propulsão, seja em modo totalmente elétrico ou híbrido. Pelo menos **50% são híbridos ou híbridos plug-in, e cerca de 13% são totalmente elétricos**.

Atualmente, as **baterias de íões de lítio são a opção mais utilizada no setor marítimo**, no entanto, esta tecnologia apresenta **riscos significativos**, nomeadamente **incêndios e explosões**, que resultam de fenómenos como a fuga térmica e a emissão de gases. Foi a Suécia um dos primeiros países a usar embarcações movidas a eletricidade, ainda que em projetos muito recentes. Para já, em conexões entre cidades na suécia e Dinamarca, com capacidade de transporte de 1250 passageiros e 240 carros em cerca de 20 minutos (EMSA, 2024).

A **eletricidade é uma boa solução para garantir as emissões zero das embarcações**, no entanto a baixa densidade energética das atuais baterias impede uma transição total em todo o setor. Para conseguirem fornecer a mesma quantidade de energia, criam **problemas de peso nas embarcações**, especialmente para grandes embarcações, aeronaves e alguns veículos pesados de longo curso. Para estes modos de transporte, são precisos combustíveis com maior densidade energética, talvez biocombustíveis ou combustíveis sintéticos. No entanto, isso traz dois desafios principais: a **disponibilidade limitada de biocombustíveis sustentáveis** e, segundo, a **imaturidade tecnológica** e os **custos elevados dos eletrocombustíveis**. A bioenergia é um recurso escasso e, idealmente, não deve ser utilizada quando existem alternativas viáveis. Além disso, a **produção de eletrocombustíveis ainda ocorre em pequena escala**, e apresenta custos significativamente mais elevados em comparação com as alternativas fósseis (Silva, et al., 2022)

De acordo com (Pense, 2022), os **maiores desafios para a eletrificação** total da indústria marítima estão relacionados com **questões técnicas e políticas**. As **baterias** que existem atualmente **não conseguem, de forma economicamente viável, garantir uma navegação e operações seguras**, especialmente para navios de maiores dimensões. Além disso, a **infraestrutura elétrica dos principais portos precisará de uma reformulação significativa** para suportar a nova procura. Por fim, o uso de fontes de **energia renováveis e sustentáveis, como a eólica e a solar, são fundamentais**. Para aumentar a sustentabilidade, a produção de energia nas regiões onde se localizam os principais portos terá de se orientar mais para fontes renováveis. Por esta razão, uma transição energética bem-sucedida para a eletrificação deste setor exige uma **abordagem harmonizada** por parte de organizações internacionais, decisores políticos nacionais, investigadores e da própria indústria marítima, de forma a ultrapassar e responder a estes desafios. Numa primeira instância, a **ligação elétrica em terra é um fator determinante para esta transição**. Tal como acontece em aeroportos, os navios enquanto estão atracados podem ligar-se à rede elétrica terrestre. Esta solução permite que os navios desliguem os motores e utilizem a eletricidade proveniente de terra para se manterem operacionais, reduzindo a poluição do ar e as emissões sonoras nas áreas portuárias. No campo da eletrificação e de soluções digitais, também é importante **harmonizar os sistemas de informação** de navegação com o objetivo de **aumentar a segurança e a eficiência na navegação**. Este esforço, conhecido como *e-navigation*, envolve a adoção de tecnologias digitais, automação e troca de dados, resultando em processos de navegação mais eficientes.

A atual **baixa densidade energética** dos sistemas de armazenamento de energia disponíveis faz com que sejam uma opção preferencial para **viagens de curta distância, ou serviços que exigem baixa autonomia**. Por essa razão, o registo de navios mostra que o maior número de instalações se encontra em ferries de automóveis e passageiros, bem como em embarcações dedicadas a outras atividades que não o transporte comercial de carga em mar aberto.

De acordo com Bei et al. (2024), as **baterias de íões de lítio são consideradas a melhor tecnologia para a eletrificação de navios**, tendo em consideração a densidade energética, a durabilidade e os requisitos de segurança exigidos para este tipo de sistemas. A **eletrificação de embarcações** de cruzeiro de curta a média distância, navios de transporte, embarcações de trabalho, rebocadores e navios de carga a granel que operam em águas interiores, lagos e zonas costeiras **apresentam vantagens económicas** quando considerados os custos

de investimento iniciais, e o consumo anual de eletricidade. Embora os navios elétricos impliquem um custo inicial mais elevado, os menores custos operacionais a longo prazo tornam-nos viáveis economicamente. **À medida que o custo das baterias diminui, as vantagens económicas dos navios elétricos tornar-se-ão ainda mais evidentes.**

Atualmente, o **mercado marítimo representa menos de 1% do total de baterias de íões de lítio produzidas anualmente**, o que em parte explica os custos mais elevados associados à introdução de sistemas de baterias em navios. Em 2023, havia 1.083 navios com baterias em operação (Fig. 13), com mais 160 já encomendados para 2024. Dados do Observatório Europeu dos Combustíveis Alternativos (EAFO), recebidos em 2024, revelam um total de 257 navios em operação com baterias na União Europeia (mais 82 encomendados em 2023), sendo a maioria composta por ferries de transporte de automóveis e passageiros (110) (EAFO, 2024). Os principais tipos de navios a utilizar baterias são ferries, navios de apoio offshore e embarcações de pesca. Atualmente, a **maioria dos navios com baterias utiliza sistemas híbridos.**

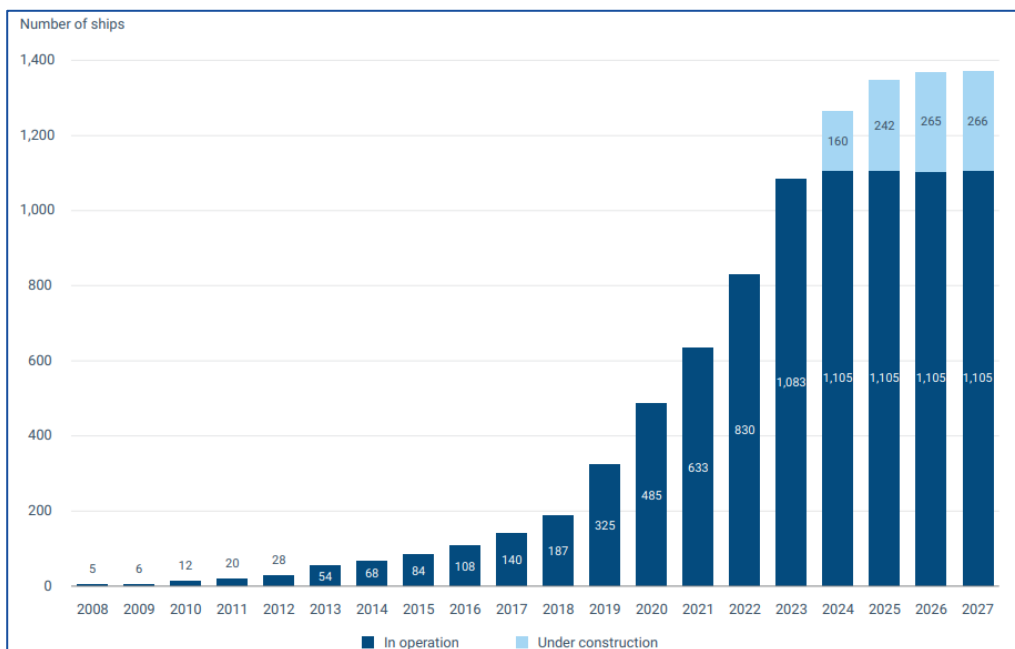


Figura 13. Número total de navios com baterias e projetos de construção conhecidos para 2024-2027.  
Fonte: The ship register — Maritime Battery Forum, 2024

Em conclusão, os navios totalmente elétricos não só apresentam **benefícios ambientais significativos para a sociedade**, como também são **financeiramente sustentáveis**. Ainda que atualmente não seja possível aplicar a eletrificação às embarcações de maiores dimensões, é urgente manter a sociedade alinhada com esse objetivo, e **financiar projetos que continuam o caminho de investigação e desenvolvimento** de tecnologias que respondam a esta necessidade. Ao comparar a intensidade das emissões de carbono de navios elétricos com navios tradicionais a diesel, e ao rever estudos anteriores sobre a redução de emissões em navios elétricos, a **eletrificação destaca-se como uma das principais estratégias para reduzir as emissões no setor marítimo**, apresentando um bom desempenho na mitigação dos gases com efeito de estufa. No entanto, há uma ligação entre as emissões de carbono dos navios elétricos e o grau de sustentabilidade da rede elétrica, ou seja, quanto maior a percentagem de energias renováveis no *mix* energético, menores serão as emissões. Por esta razão, **a sustentabilidade desta alternativa está dependente da sustentabilidade da origem da energia elétrica para assegurar a sua sustentabilidade**. As baterias atualmente disponíveis permitem alcançar a eletrificação total de embarcações que operam em rotas de curta distância, mas ainda serão precisos novos avanços e desenvolvimentos para que sustentem embarcações em rotas mais longas.

### 6.1.5. Metanol

O metanol é um composto líquido que mantém a **estabilidade em condições ambientais normais** e com uma **alta densidade de armazenamento**. Além disso, o metanol é uma **tecnologia bem desenvolvida e com infraestruturas bem estabelecidas** (Wang et al., 2023). O seu estado líquido às condições normais torna-o um **combustível fácil de gerir para diversas aplicações**. Segundo um relatório técnico recente do Centro Comum de Investigação da UE, o LNG e o **metanol destacam-se atualmente como os combustíveis alternativos mais promissores para a navegação**, em parte devido à **ampla disponibilidade do metanol na maioria dos principais portos** (Parris et al., 2024). Contudo, o metanol apresenta algumas vantagens quando comparado com o LNG, como a facilidade de armazenar a bordo. A produção global de metanol ronda atualmente os 90 milhões de toneladas por ano, sendo cerca de 65% proveniente do gás natural por reforma com vapor de metano e os restantes 35% provenientes do carvão através de gasificação (Sollai et al., 2023).

Stena Line foi a primeira empresa de transporte marítimo a usar metanol como combustível para navios. O metanol é produzido através do gás natural e apresenta uma redução da emissão de CO<sub>2</sub> na ordem dos 25%, tal como LNG, e uma redução de 9% para SO<sub>x</sub>, 60% para NO<sub>x</sub> e 95% para PM. **A sua produção de forma renovável permite uma redução até 95% nas emissões de dióxido de carbono, uma diminuição de até 80% nas emissões de óxidos de azoto e elimina completamente as emissões de óxidos de enxofre e de PM** (Duraisamy et al., 2020). Este tipo de combustível ainda oferece vantagens, uma vez que pela semelhança a outro combustível, **não há necessidade de grandes modificações/ adaptações nos navios e infraestruturas de abastecimento**. Contudo, segundo Center for Zero Carbon Shipping (2024), o custo total adicional de construção nova e conversão para navios novos ou convertidos para metanol varia entre 14 e 35% do custo de uma construção nova padrão a fuelóleo. Como a utilização de combustíveis alternativos como o metanol exige espaço extra para armazenar mais combustível (por serem menos densos energeticamente), manter o alcance de navegação num navio VLCC (Very Large Crude Carrier) normalmente não compensa economicamente, porque reduz a capacidade de carga. Se o objetivo for usar metanol logo após a construção do navio (dentro de 1,5 anos), então faz sentido investir diretamente numa construção nova com motor dual-fuel e alcance total. No entanto, se for aceitável que o navio tenha um alcance menor, construir um dual-fuel pode ser vantajoso mesmo que só comece a operar com o novo combustível entre 4 e 6 anos após a construção — dependendo do tipo de combustível.

Quando se opta por construir o navio preparado para uma conversão futura (em vez de ser já dual-fuel), o grau de preparação pode representar um custo adicional de cerca de 1 a 6% em relação ao custo de um navio novo a fuelóleo, ou de 5 a 7% no caso de um navio novo a LNG. Tal como acontece com o modelo LR2 (embarcação usada como exemplo no estudo mencionado), essa diferença de custo é maior no caso dos navios a LNG porque os tanques e sistemas usados não servem para metanol — esses tanques têm de ser instalados mais tarde, durante a conversão.

É ainda importante destacar que as emissões de GEE provenientes de **metanol não renovável, produzido a partir de gás natural, são ligeiramente superiores às do fuelóleo pesado (HFO) e do gasóleo marítimo**. No entanto, a utilização de metanol renovável **derivado de biomassa** pode levar a uma redução de aproximadamente 56% no impacto em GEE face ao HFO.

Este tipo de combustível é adequado para motores de combustão interna, turbinas a gás e células de combustível, além de ser **mais fácil de armazenar em comparação com outros combustíveis alternativos**. O metanol é amplamente disponível e possui uma cadeia de abastecimento bem desenvolvida, sendo amplamente utilizado na indústria química, apresentando-se como uma alternativa competitiva, oferecendo **períodos de retorno de investimento mais curtos em comparação com outras opções**. Por isso, este destaca-se como o **“combustível alternativo ideal” devido à sua “disponibilidade imediata”, uso de infraestruturas existentes, custo reduzido e simplicidade tanto no design do motor como na tecnologia marítima**. Atualmente, as principais abordagens para integrar o metanol em motores diesel envolvem a mistura direta, a injeção no coletor (port injection) e a injeção direta no cilindro, conforme descrito em (Arnaiz et al., 2022), (Guo et al., 2011).

Em questões de segurança, o metanol também apresenta características como a **miscibilidade**, que o favorecem em relação com os hidrocarbonetos. Ou seja, em caso de derrame, a sua **capacidade de diluição impede que se atinjam concentrações perigosas**. No entanto, devem ser tidas em conta as preocupações de segurança associadas ao armazenamento de metanol, devido ao seu baixo ponto de inflamação (Ni et al., 2020), chama invisível e avaliação do ciclo de vida em comparação com outros combustíveis (Tadros et al., 2023).

Autores como Xing et al. (2021) recomendam considerar o metanol como uma potencial fonte de energia para células de combustível marítimas, mesmo na **ausência de regulamentação internacional estabelecida para estes sistemas**.

Em suma, **o metanol** desempenha um papel fundamental como **uma solução transformadora no panorama energético marítimo**, especialmente num momento crítico para a indústria marítima no cumprimento das metas de redução de emissões. A intensificação da procura global pelo transporte marítimo exige uma mudança de paradigma no sentido da adoção de combustíveis sustentáveis, de forma a mitigar impactos ambientais e de saúde.

Devido à sua forma e características, o metanol aparece como uma **alternativa de fácil e rápida aplicação no contexto atual**, ainda que restem **desafios como questões de segurança**. A produção deste combustível através de fontes renováveis e mais sustentáveis é um dos caminhos para tornar o metanol ainda mais atrativo. Atualmente, **há oferta suficiente de metanol**, mas a **maioria é produzida a partir de gás natural ou até carvão** (como na China). Para descarbonizar o setor marítimo, será essencial aumentar significativamente a produção de e-metanol, o que dificilmente acontecerá antes de 2030.

### 6.1.6. Nuclear

Dentro de todos os combustíveis alternativos avaliados, o **Nuclear** aparece como o combustível que oferece vantagens como **zero emissões, não necessidade de abastecimento frequente, baixo peso e permite atingir velocidades mais altas**. No entanto, estes benefícios devem ser analisados com as desvantagens, ou preocupações, que surgem em **questões de segurança, da necessidade de um grande investimento inicial, do impacto ambiental em caso de acidente ou na gestão e tratamento dos resíduos radioativos que resultam do seu uso**.

De acordo com o relatório Maritime Forecast 2050, feito pela Det Norske Veritas, atualmente, os **reatores nucleares estão presentes em cerca de 160 embarcações**, principalmente em **porta-aviões e submarinos navais** dos Estados Unidos, além de **quebra-gelos russos, um navio mercante e uma usina nuclear flutuante**. A propulsão nuclear é utilizada estrategicamente para operações autônomas de navios navais e quebra-gelos, enquanto os primeiros navios de mercadorias nucleares - Savannah, Otto Hahn, Mutzu (Schøyen & Steger-Jensen, 2017) – acabaram por não resultar numa ampla adoção da tecnologia na navegação comercial (DNV, 2023). A tecnologia de propulsão nuclear a bordo tem o **potencial de descarbonizar navios sem depender de alternativas neutras em carbono baseadas em eletricidade renovável, biomassa sustentável ou energia fóssil com captura e armazenamento de carbono**. No entanto, a propulsão nuclear enfrenta vários **desafios a nível de regulamentação, percepção pública, bem como desafios para os modelos de negócios convencionais**.

Ao contrário de outras alternativas de combustível, a propulsão nuclear vai exigir uma aprovação por parte de autoridades reguladoras nacionais e de energia nuclear, além das regras da IMO, de autoridades portuárias e de organizações reconhecidas. Os principais fatores a considerar são os **custos e as garantias de fornecimento**, dado que as cadeias de fornecimento de combustível nuclear já são limitadas e estão a diminuir com a crescente procura de autonomia estratégica por parte de vários países na indústria do combustível nuclear. Antes deste combustível passar a uma alternativa para o setor marinho, é **importante que exista um sistema regulatório sólido e coeso**, para garantir um sistema seguro e funcional.

No contexto internacional, a China e a Coreia do Sul são dois países de sucesso para o setor nuclear. Em terra, os **pequenos reatores modulares (SMRs)**, são uma fonte de **esperança aos esforços que têm sido feitos no sentido de trazer este combustível para o setor marítimo**. No entanto, vários reguladores concordam que é necessário que a implementação dos projetos SMRs sejam mais rápidos e eficientes (DNV, 2023)

### 6.1.7. Hidrogénio

Atualmente, o **Hidrogénio é produzido maioritariamente através do gás natural**, mas ainda é **insuficiente para a procura global**, estando atualmente nas 94 milhões de toneladas. Espera-se que no futuro possa ser, em grande escala, produzido através de energias renováveis, o que ajudaria a reduzir a dependência de combustíveis fósseis. As **combustões de Hidrogénio verde não geram GEE, SO<sub>2</sub>, CO, metais pesados, hidrocarbonetos** - sendo a única emissão as partículas em suspensão. As emissões de NO<sub>x</sub> podem ser controladas através da otimização dos processos de combustão. O **Hidrogénio pode ser usado diretamente como combustível, ou como uma forma limpa de produção de energia**. Em 2023, o Hidrogénio produzido foi essencialmente através do gás natural e do carvão (Hidrogénio cinzento). Espera-se que o aumento da produção de hidrogénio através de fontes renováveis aumente, principalmente devido a nova legislação e incentivos governamentais nesse sentido. A utilização de **Hidrogénio verde pode oferecer uma redução de cerca de 97% dos GEE** comparado com o Hidrogénio cinzento, e cerca de 96% quando comparado com gásóleo.

A produção do Hidrogénio verde pode acontecer através de diversos métodos, como a eletrólise, usando energia renovável, através de conversão termoquímica de biomassa, através da fermentação de biomassa e através da energia solar. Contudo, um dos **desafios é a pouca quantidade disponível de biomassa sustentável**, colocando a eletrolise como a alternativa mais viável – método que requereria um aumento da produção de energia renovável. Neste caso, é importante referir que a **capacidade global de eletrólise dedicada à produção de Hidrogénio**

verde é atualmente apenas **0,3 GW**, enquanto a capacidade global atingiu os **260 GW em 2021**. Este método requer ainda que se use água pura e destilada, o que pode levar à **escassez de água** com o aumento da sua produção, abrindo oportunidade para que a água dessalinizada possa ser uma opção. Por último, a produção de hidrogénio verde pode causar impactos ambientais e **mudanças no uso do solo**, devido a uma **grande instalação de parques eólicos e solares**, por exemplo. Neste caso, é necessária mais investigação antes de ampliar significativamente a sua produção.

Relativamente às emissões, as **fugas de Hidrogénio também contribuem para o aquecimento global**, uma vez que o próprio é um gás com efeito de estufa indireto. Contudo, vários estudos comprovaram que mesmo com perdas de Hidrogénio até 10%, esta transição teria um **impacto climático positivo** devido à redução do uso dos combustíveis fósseis. A combustão de hidrogénio pode produzir NO<sub>x</sub>, mas estas emissões tendem a ser inferiores às dos motores a HFO, desde que haja controlo adequado da combustão e tratamento por SCR - Redução catalítica seletiva. Além disso, o hidrogénio **reduz significativamente outros poluentes como SO<sub>2</sub>, CO, metais pesados, hidrocarbonetos, PAHs e partículas em suspensão**.

Contudo, o hidrogénio apresenta uma **baixa densidade energética**, o que pode gerar problemas de armazenamento sendo, por isso, mais **aconselhado para o transporte marítimo curta distância**. Os tanques pressurizados permitem armazenar hidrogénio gasoso, mas a sua baixa densidade (muito volume) e o elevado custo favorecem a sua aplicação em distâncias mais curtas, onde o apoio em zonas portuárias é mais frequente e ajuda a mitigar estas limitações. Outro problema que surge é o **gasto de energia usada para manter a pressão e temperatura**. Este problema pode ser mais ou menos desafiante considerando as características do navio. Para rotas de longa distância, opções como LOHC - transportadores orgânicos líquidos de hidrogénio, e amónia são soluções de armazenamento de hidrogénio potencialmente mais económicas do que o armazenamento físico. O uso de LOHCs no transporte marítimo requer **investigação adicional**, uma vez que vai afetar o design do navio e exigirá o desenvolvimento de sistemas de desidrogenação para libertar o hidrogénio a bordo, o que poderá levar ao desenvolvimento de motores de grande cilindrada para utilizar o hidrogénio como combustível marítimo.

Outras preocupações importantes relacionadas ao hidrogénio incluem a sua **inflamabilidade, potencial de libertação, velocidade de chama e problemas de deflagração**. As **tecnologias para a combustão deste combustível ainda não estão totalmente desenvolvidas**, e as disponíveis ainda são **muito pequenas e caras**, para além do preço do próprio combustível, que também já é **mais caro que os combustíveis convencionais**.

Para evitar estes desafios, para além do uso de hidrogénio, estão a ser avaliados outros compostos à base de hidrogénio, como amónia, metanol e outros transportadores líquidos de hidrogénio, para aplicações marítimas. O uso de combustíveis alternativos também tem emissões poluentes, mas que podem ser minimizadas e mitigadas.

Em termos de custos para os donos das embarcações, a **diferença entre o custo de embarcações movidas a combustíveis fósseis e movidas a Hidrogénio pode anular-se caso os custos de produção de hidrogénio baixem e os custos dos combustíveis fósseis aumentem** com o preço do carbono. Ainda há um **grande custo no desenvolvimento da infraestrutura de abastecimento de hidrogénio** para embarcações, bem como o sistema de tanques para armazenar hidrogénio a bordo. No entanto, até lá, continuam a existir alternativas mais acessíveis que também podem ajudar na transição para a navegação com emissões zero.

Embora o uso de hidrogénio como combustível marítimo tenha pouca regulamentação, existem métodos como a aprovação de "designs alternativos" para apoiar a adoção. Organizações reconhecidas estão a desenvolver diretrizes e a UE está a implementar regulamentações de GEE com iniciativas como o "Fit-for-55", que devem incentivar a transição para combustíveis de baixo carbono. A IMO também está a discutir medidas de análise do ciclo de vida e baseadas no mercado, que poderão apoiar o uso de hidrogénio

### 6.1.8. Combustíveis sintéticos

OS **combustíveis sintéticos** são misturas de monóxido de carbono com hidrogénio. Os combustíveis sintéticos podem ser uma alternativa interessante aos combustíveis tradicionais. É possível dividir este tipo de combustíveis em 2: **combustíveis renováveis de origem não biológica (RFNBOs) e electrocombustíveis (e-fuels)**. Estes imitam as características típicas dos combustíveis fósseis, mas são produzidos sem recurso a biomassa. Estes combustíveis podem **reduzir as emissões de carbono quase a zero**.

Os combustíveis sintéticos com um **maior potencial de serem usados como combustíveis marinhos são o e-metanol, e-metano, e-diesel, e-hidrogénio e e-amónia**. A produção destes combustíveis requer Hidrogénio renovável, que é **principalmente produzido através da eletrólise, usando energia renovável**. A produção de CO<sub>2</sub> (de origem não biológica), é por **captura direta do ar**. Este processo requer gasto de energia (renovável), e usa um absorvente/adsorvente para a captura do CO<sub>2</sub> do ar. Um outro processo, ainda que num estado muito inicial de desenvolvimento, baseia-se na **captura de carbono da água do mar** em vez do ar. Neste momento - não deixando para trás o desenvolvimento tecnológico, é mais **rentável avançar com processos mais desenvolvidos, como a eletrólise**, para obter Hidrogénio e CO<sub>2</sub> biogénico (da produção de biometano), podem

ser usados como um meio alternativo para aumentar a produção de e-combustíveis. Os sistemas de captura de CO<sub>2</sub> da atmosfera/oceano devem ir sendo desenvolvidos em paralelo.

Uma vez que a **produção de e-combustíveis ainda é limitada**, são **poucos os dados disponíveis para medição das emissões**. No entanto, sabe-se que é possível com estes combustíveis **reduzir as emissões de GEE em 94%**, incluindo as emissões associadas à produção. As **emissões de NO<sub>x</sub> podem ser reduzidas entre 20 - 80% comparando com outros combustíveis fósseis marinhos**, dependendo do e-combustível usado e do tipo de tecnologia do motor. Relativamente às **partículas em suspensão, as emissões serão reduzidas** com uso de e-metano e e-metanol, e sensivelmente reduzidas com uso do e-diesel. Esta alternativa também vai **reduzir as emissões de SO<sub>x</sub>**, uma vez que **estes combustíveis são pobres ou mesmo isentos de enxofre**.

Outro problema está relacionado com a **perda de biodiversidade inerente à expansão dos campos de produção de energia solar, eólica e captura de CO<sub>2</sub> da atmosfera** – problema que pode ser mitigado com o avanço tecnológico. Tal como em outros combustíveis alternativos, a longo prazo podem surgir **problemas de falta de água**, uma vez que tanto a eletrólise como a captura de CO<sub>2</sub> da atmosfera necessitam de utilizar água doce. O **impacto de derrames** mantém-se um problema, ainda que consiga degradar-se em cerca de 2 meses, o e-diesel tem **impactos na fauna marinha** - ainda pouca informação sobre os potenciais impactos, o que aumenta a incerteza sobre sua adoção. A produção em larga escala exigirá um grande crescimento na infraestrutura da eletricidade, que levanta **preocupações nos processos de geração de eletricidade renovável, a conversão energética, o uso de áreas terrestres e marítimas e os potenciais resíduos poluentes**. Além disso, o setor marítimo enfrentará a **concorrência de outros setores por energia renovável**. Pois embora existam locais adequados para a produção de eletricidade renovável, a capacidade dos países para construir parques solares e eólicos, sistemas de conversão, infraestrutura de transporte e distribuição ainda é limitada.

A longo e médio prazo, **vão ser necessárias quantidades de carbono renovável** para a produção de combustíveis neutros, sendo necessário **considerar outras alternativas para além do CO<sub>2</sub> biogénico**. A substituição do CO<sub>2</sub> biogénico por CO<sub>2</sub> capturado do ar pode reduzir a pressão sobre a biodiversidade, desde que não se ocupem terrenos agrícolas. Caso se **use água doce, deve ser de fonte e forma sustentável**, e a dessalinização – a acontecer- deve ser gerida de forma a **evitar impactos no ambiente marinho**.

É esperado que **até 2050 a diferença de custo entre as embarcações movidas a e-combustíveis e combustíveis fósseis seja praticamente nula**, devido ao decréscimo do preço de produção de e-combustíveis enquanto há aumento dos custos de carbono. Apesar de não requerer investimentos adicionais em equipamentos, o **e-diesel continua a ser uma opção mais cara no curto e médio prazo devido aos elevados custos de produção, especialmente quando utilizado como único combustível**. No entanto, caso a conformidade com a regulamentação possa ser atingida com uma quantidade reduzida de e-diesel, este pode tornar-se uma alternativa economicamente mais viável face a outros e-combustíveis.

Os e-combustíveis apresentam-se como uma das alternativas viáveis, principalmente devido a:

- **Menor teor em carbono;**
- Natureza “Drop-in” – **permite a sua utilização sem necessidade de grandes adaptações** ou implicações relacionadas com riscos.

Espera-se que a **evolução da legislação, da indústria e das boas praticas facilitem a adoção dos e-combustíveis**, ainda que sejam precisos desenvolvimentos para que estas alternativas tenha uma ampla adoção.

Em suma, todas as alternativas de combustível apresentam pontos positivos e negativos, **dificultando a escolha de um combustível ideal** assumir o papel de combustível alternativo. A tabela seguinte agrupa alguns dos combustíveis alternativos mais presentes em estudos recentes. As agrupadas na tabela seguinte, são o compilar das informações presentes em cada subcapítulo anteriormente apresentado, e de uma revisão de literatura feita por Kondratenko et al. 2025.

Tabela 2. Sumário das características dos combustíveis alternativos mais promissores para o setor marítimo, compilação da informação apresentada anteriormente.

Combustíveis	Tipos de Navios	Custo da adaptação (% valor de mercado de um navio)	Oportunidades	Desafios
Amónia	Navio Tanque; Navio Graneleiro; Navio de Abastecimento	De 15 to 50 + %	Procedimentos de segurança são bem conhecidos	Toxicidade, corrosividade e inflamabilidade
Biocombustíveis	Navio roll-on/roll-off; Navio porta contentores	De 13 to 20 %	não requerem mudanças significativas nas infraestruturas	Escassez de biomassa; falta de normas internacionais harmonizadas sobre critérios de sustentabilidade
Eletrificação	Navio roll-on/roll-off; Navio de passageiros; Navio Porta Contentores	De 35 % to 180 %	redução da emissão dos GEE, design e operações - diminuir a necessidade de manutenção	a baixa densidade energética das atuais baterias - n/a a embarcações de maiores dimensões
Hidrogénio	Navio de passageiros; Navio de Cruzeiro; Rebocadores	De 100 to 160 %	Hidrogénio verde; Só emite PM	Problemas de armazenamento; inflamabilidade, potencial de libertação, velocidade de chama e problemas de deflagração; Preço do combustível
Metanol	Navio de apoio; Navio Tanque; Rebocador	De 12 to 16 %	não há necessidade de grandes adaptações; ampla disponibilidade;	Emissões altas no caso de metanol não renovável
Gás Natural Liquefeito	Navio metaneiro	De 11 to 70 %	reduzir os impactos ambientais para a maioria das métricas de qualidade do ar	Emissões de metano
Combustíveis sintéticos	Navio porta Contentores; Navio de Abastecimento	De 11 to 70 %	Menor teor em carbono; Natureza "Drop-in"	poucos dados para medição das emissões; Consumo de água na eletrólise; concorrência por energias renováveis
Nuclear	Navio Quebra-gelo	De 400 to 500 + %	0 emissões, não necessidade de abastecimento frequente, baixo peso e permite atingir velocidades mais altas	segurança, da necessidade de um grande investimento inicial e do impacto ambiental em caso de acidente

Das alternativas acima analisadas, podemos perceber que os navios movidos a **Nuclear** ainda são um desafio, principalmente devido à **negativa percepção pública e aos elevados investimentos iniciais necessários**. Mesmo considerando os benefícios económicos que se podem fazer sentir a longo prazo, não se aplica ao ciclo de vida reduzido dos navios existentes.

O **Gás Natural Liquefeito**, perdeu popularidade como alternativa sustentável, devido a uma **eficácia limitada na descarbonização e risco de libertação de metano**. Derivado do LNG, o biogás é uma opção com maior potencial de descarbonização, mas o risco de emissão de metano continua elevado para ambas.

O **Hidrogénio** é um dos combustíveis alternativos com **maior capacidade de descarbonização**, no entanto, não é considerada uma das opções mais viáveis devido aos **elevados custos iniciais e à baixa densidade energética**. Ainda que levante preocupações quanto ao risco de explosão e eficiência ambiental, pode ser uma **opção viável para ferries e cruzeiros**, onde outras opções como baterias e amoníaco apresentam limitações, como o peso, volume e a toxicidade, respetivamente.

Os **Biocombustíveis** apresentam uma **densidade energética semelhante aos combustíveis marítimos tradicionais**, sendo **compatíveis com os sistemas de armazenamento** – o que reduz os custos associado a adaptações. Contudo, **não são tão eficazes no combate às alterações climáticas**, e a **competição pelo seu fornecimento pode ser elevada**.

O **Metano** é um dos combustíveis alternativos que já está **tecnicamente pronto para ser usado** no contexto marítimo, com uma eficácia na descarbonização que depende da sua fonte de produção. A sua produção verde pode ser cara, devido à elevada procura por matérias-primas, e devido à sua **baixa densidade energética**, necessita de tanques duas vezes maiores do que os combustíveis tradicionais. Por isso, apesar de apresentar **vantagens tecnológicas e baixo custo de adaptação**, também surgem dúvidas quando à sua competitividade futura.

A **Amónia** destaca-se como uma das **opções mais promissoras** para adaptação, devido ao seu **baixo custo de implementação, reduzidas emissões de GEE, maturidade tecnológica e aceitação pública**. No entanto, é **altamente tóxica** para a saúde humana e para o ambiente. Fugas causadas quer seja por falhas ou erro humano **podem gerar emissões significativas de GEE**. A sua aplicação está limitada a navios com pouca tripulação, como petroleiros, graneleiros, navios de abastecimento e porta-contentores.

A **propulsão elétrica com baterias**, recarregadas em terra, é outra opção útil de descarbonização. O custo de adaptação varia muito – de 35% a 180% do valor de mercado do navio, dependendo da distância de operação. Embora seja uma **tecnologia não tóxica**, adequada para navios de passageiros, a **densidade energética baixa** e o espaço necessário para o sistema de baterias podem **afetar a estabilidade e a capacidade de carga**. Assim, a sua aplicação é viável sobretudo em navios pequenos ou de operação costeira.

Em resumo, os **biocombustíveis, metanol, amónia e energia elétrica por baterias são as opções mais promissoras** para adaptação da frota existente, cada uma com características específicas que as tornam mais adequadas para diferentes segmentos de navios. Considerando que **cerca de 40% da frota mundial é composta por petroleiros e graneleiros**, a **amónia destaca-se como a opção com mais potencial para adaptações futuras**.

De acordo com previsões da MAN Energy Solutions (Fig. 14), o uso de LNG/metano como principal combustível em motores dual fuel de dois tempos deverá cair de 63% em 2023 para 23% em 2034. Em contrapartida, a amónia crescerá de 0% para 47% no mesmo período, tornando-se o combustível dominante em 2034. O metanol também aumenta de forma constante, atingindo 31% em 2034. Esta evolução reflete uma transição gradual para combustíveis alternativos com menor impacto ambiental, em linha com os objetivos de descarbonização do setor marítimo.

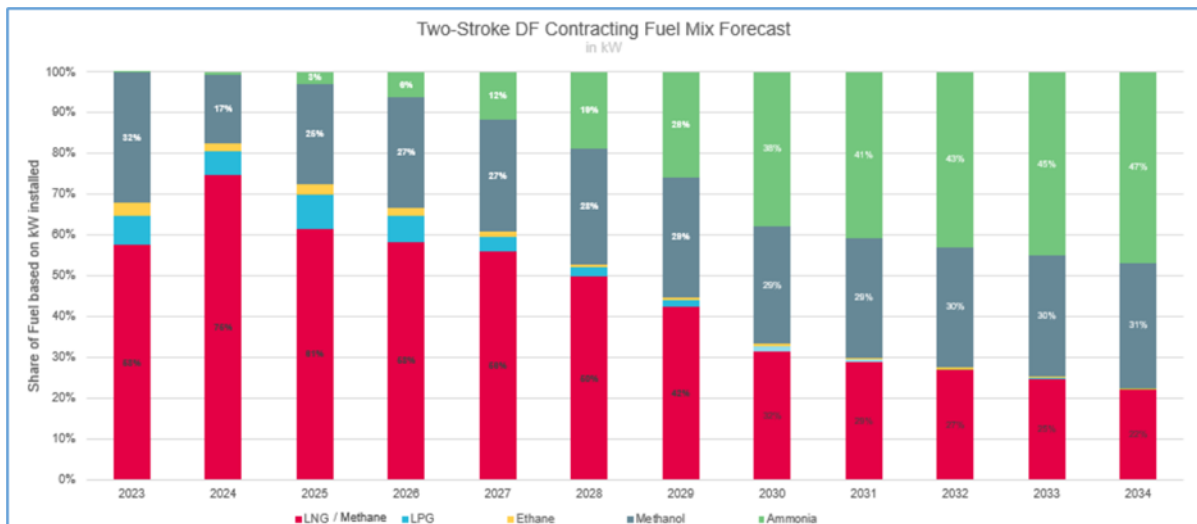


Figura 14. Previsão da distribuição de combustíveis em novos pedidos de motores dual fuel de dois tempos (2023–2034). Fonte: MAN Energy Solutions, 2025 (2025 Net Zero Maritime Conference).

No entanto, é também importante analisar algumas tendências do mercado relativamente à adoção destes combustíveis e ao cumprimento com a legislação. A figura seguinte (Figura 15) ilustra a evolução histórica dos preços de diferentes biocombustíveis (P.O. FAME, UCO FAME, UCO HVO, P.O. HVO) em comparação com os níveis de multas por emissões de carbono no setor marítimo.



Figura 15. A análise da T&E (2025) baseia-se nos preços históricos de diferentes biocombustíveis. A análise utiliza uma intensidade de 17.25 gCO<sub>2</sub>e/MJ para UCO HVO e 91.39 para VLSFO. Os preços do VLSFO representam valores históricos em Roterdão.

Os dados históricos de preços dos biocombustíveis excederam frequentemente a penalidade atual, o que sugere que pagar uma multa era economicamente mais vantajoso do que adotar combustíveis alternativos. A penalidade FuelEU, mais alinhada com os custos estimados dos futuros e-combustíveis verdes, demonstra uma tentativa de criar um incentivo económico mais forte para a transição para combustíveis mais limpos. A informação apresentada sugere que as penalidades iniciais podem não ser suficientemente elevadas para garantir a conformidade com

opções de combustível mais sustentáveis, especialmente considerando os custos iniciais mais altos dos e-combustíveis.

## 6.2 Reciclagem de Navios

As práticas de **desmantelamento de navios** continuam a levantar preocupações devido aos seus impactos ambientais. A **maior parte dos navios é desmantelada em estaleiros que utilizam métodos prejudiciais, impedindo uma reciclagem sustentável**. A Convenção de Basileia regula internacionalmente os resíduos perigosos, incluindo os navios, e **proíbe a exportação de resíduos perigosos para países fora da OCDE**. Na União Europeia, o Regulamento (CE) 1013/2006 aplica as normas da Convenção de Basileia, **proibindo a exportação de navios para reciclagem em estaleiros fora da OCDE**. No entanto, a **falta de capacidade nos países da OCDE e a concorrência desleal pelos estaleiros de baixa qualidade** destacam a **ineficiência da legislação atual**, levando à solicitação da IMO, em 2004, para a adoção de normas obrigatórias. Em 2009, foi adotada a Convenção de Hong Kong para a **Reciclagem Segura e Ambientalmente Correta dos Navios**, que **entrará em vigor** após a ratificação por 15 Estados cujas frotas representem 40% da arqueação bruta mundial - 26 de junho de 2025. A Convenção abrange o projeto, a construção e a operação de navios e estaleiros de reciclagem, promovendo a segurança e a eficiência na reciclagem. A partir da sua entrada em vigor, todos os navios com **arqueação bruta igual ou superior a 500 toneladas** deverão possuir a bordo um **inventário das matérias perigosas**. Os estaleiros de reciclagem autorizados deverão **fornecer um plano de reciclagem específico para cada navio a ser reciclado**.

Além disso, em 2013, o Parlamento Europeu aprovou o Regulamento (UE) 1257/2013 para **melhorar a reciclagem de navios, prevenindo acidentes, protegendo a saúde e o ambiente** e facilitando a ratificação da Convenção de Hong Kong. Este regulamento estabelece requisitos para incluir estaleiros de reciclagem na Lista Europeia e exige **inspeções regulares**. Este Regulamento vai além da Convenção de Hong Kong, impondo normas mais rigorosas para garantir a segurança e a sustentabilidade na reciclagem de navios. A legislação **visa reduzir disparidades entre operadores da União Europeia, países da OCDE e outros**, garantindo que os navios da UE sejam reciclados em estaleiros que adotem práticas seguras e ecológicas (DGRM<sup>2</sup> e IMO<sup>3</sup>).

Os estados-membros da UE e a Noruega declararam um total de 90 navios para os quais foi emitido um certificado a permitir a sua reciclagem, entre 1 de janeiro de 2019 e 31 de dezembro de 2021, assegurando que cumpriam os requisitos ambientais de segurança para serem desmantelados e reciclados em estaleiros da UE. Desses navios, **41 concluíram o processo de reciclagem**. Esses navios foram reciclados em sete instalações de reciclagem, com a Turquia a reciclar a maior parte (50%). No entanto, em 2022, enquanto a participação de navios com bandeira de um Estado-Membro da UE era de 13,2% da frota mundial total, apenas 7% dos navios no fim de vida reciclados estavam registados sob um Estado-Membro da UE no momento da reciclagem. Isso destaca que o **objetivo de reciclagem segura e ambientalmente correta** dos navios, como perseguido pela legislação da UE, ainda é contornado pela mudança de registo/bandeira das embarcações (EMSA, 2024).

## 6.3 Design

Ao longo das últimas décadas, a indústria naval e marítima tem tentado melhorar a eficiência e durabilidade das estruturas. Tradicionalmente, o **alumínio e o aço são os materiais mais utilizados na construção de estruturas marítimas** (Delzendehrooy et al., 2022). Devido a alguns problemas destes materiais, **surgiu na indústria os polímeros reforçados com fibras**. O uso deste material resulta numa **redução significativa do peso da estrutura**, especialmente no peso acima da linha de água, o que contribui não só para o **aumento da carga útil e da velocidade**, mas também para uma **redução considerável no consumo de combustível** (Rubino et al., 2020). No entanto, a indústria naval continua a usar, na sua maioria, uma combinação de aço com estes polímeros, para garantir que não fica tão vulnerável à deflexão, uma vez que a **durabilidade** dos componentes fabricados é um **fator chave** no design estrutural para aplicações marítimas.

O **tratamento dos gases de escape** através de depuradores de SO<sub>x</sub>, da redução catalítica seletiva e da substituição por combustíveis destilados revelou ser a **solução mais eficiente e comercialmente viável**, tanto para a adaptação de navios existentes, como para a construção de novas embarcações em conformidade com os requisitos Tier I-III (Aakko-Saksa et al., 2019).

<sup>2</sup> DGRM <https://www.dgrm.pt/destaques?articleId=709247>

<sup>3</sup> <https://www.imo.org/en/about/Conventions/pages/the-hong-kong-international-convention-for-the-safe-and-environmentally-sound-recycling-of-ships.aspx>

As adaptações baseadas numa melhora do design dos navios têm um **efeito limitado, mas fiável**. Algumas das opções mais populares são pretendem **melhorar a eficiência hidrodinâmica**. Alguns exemplos incluem **bolbos de prova ou apêndices de casco**. Algumas destas modificações são de **baixo custo e conseguem reduzir até 10% as emissões**. Algumas das adaptações hidrodinâmicas do casco dependem de fatores como a velocidade, condições de carga e estado do mar. Como exemplo, o conceito de **design de proa quebra-gelo removível**, adequado para adaptação em regiões frias, é uma tecnologia que **proporciona uma redução significativa das emissões de GEE ao longo do ciclo de vida, podendo chegar até 20%** (Kondratenko et al. 2025).

Do lado do **aproveitamento do vento**, as medidas mais interessantes são os **rotores Flettner, as velas rígidas e as pipas de reboque (towing kites)** (Chica et al., 2023), (Tilling et al., 2020), (Khan et al., 2021). A primeira opção, apesar de poder atingir os **20% de eficiência** (Nuttall et al., 2016), são **poucos estéticos, e não tem aplicação em iates a motor e navios de cruzeiro**, por exemplo. Nestes casos, as **velas rígidas são geralmente consideradas uma opção apropriada para navios de passageiros**, devido à sua aparência tradicionalmente mais bem aceite, apesar da sua menor eficiência de descarbonização. De qualquer forma, a adaptação com rotores *Flettner* e velas rígidas **requer espaço significativo no convés**, sendo, portanto, mais adequada para graneleiros, petroleiros e navios de carga (Pearson, 2014). No entanto, **capacidade de descarbonização destas medidas dependem muito das condições do vento**.

Existem ainda os **sistemas de lubrificação do ar (Air Lubrication Systems)**, visam reduzir o atrito do vento, técnica **recomendada pela IMO** como técnica inovadora de eficiência energética (Resolution MEPC. 1/Circ. 815, 2013). Existem diferentes princípios alternativos de lubrificação por ar, mas a injeção de uma camada de **microbolhas de ar entre o fundo do navio e a água revelou-se a mais viável comercialmente** (Silberschmidt et al., 2016). Para além disso, estas tecnologias têm um **potencial significativo de descarbonização** oculto relacionado com a **prevenção do bioincrustamento do casco** - o que pode superar as poupanças resultantes da **redução direta da resistência por fricção**. No entanto, ainda não se conhecem bem os efeitos diretos, e uma forma de quantificar, estes métodos (Kondratenko et al. 2025). A bioincrustação no casco aumenta a resistência hidrodinâmica, que aumenta o consumo de combustível, que pode aumentar o consumo de combustível de forma considerável, dependendo do nível de incrustação. Segundo Habilic et al., 2023 a gestão da bioincrustação pode reduzir o consumo médio de combustível entre 9 % e 17 %.

Uma das **tecnologias de retrofit mais promissoras** para a descarbonização é a **captura de carbono a bordo dos navios (SBCC – Ship-Based Carbon Capture)**. Esta tecnologia satisfaz os requisitos para atingir os Objetivos 1 e 2 de descarbonização da IMO e pode competir com os combustíveis alternativos em termos de eficiência. Esta técnica **captura CO<sub>2</sub> emitido**, permitindo que os navios operem com os combustíveis tradicionais. Após a captura, o **CO<sub>2</sub> é liquefeito e armazenado** num tanque, que depois **pode ser vendido a outras indústrias**. Estas são técnicas que já estão em **testes piloto** para a sua aplicação em navios (Ros et al., 2022). **Embora a taxa de captura de carbono atinja cerca de 90–99%, a capacidade máxima de descarbonização da é de 75 a 85%** (Kondratenko et al. 2025), dado que é necessário consumir energia para a liquefação do CO<sub>2</sub>. Segundo estimativas da *Oil and Gas Climate Initiative*, o **custo de adaptação de um petroleiro Suezmax para SBCC é de cerca de aproximadamente 12 milhões de euros para uma taxa de captura de 50% e cerca de 18 milhões de euros para uma taxa de 90%**. Estes valores representam cerca de 16,5% e 25% do custo de um navio novo equivalente. Feenstra et al. calcularam que o **custo da instalação** de SBCC num navio de carga geral de 8000 GT poderia chegar aos **3 milhões de euros**, ou cerca de **30% do custo de um navio novo**. O custo operacional da captura de CO<sub>2</sub> é incerto e varia entre 100 e 160 euros por tonelada de CO<sub>2</sub> (Ros et al., 2022). Isto indica que a **SBCC pode superar as tecnologias de energia alternativa em termos de eficiência de custos**. O papel da SBCC no transporte marítimo futuro parece estar significativamente subestimado, considerando as suas vantagens competitivas. Esta tecnologia tem um elevado potencial para superar a maioria das soluções de descarbonização amplamente promovidas.

Em suma, o design das embarcações pode ser um bom primeiro passo para a descarbonização, bem como um passo adicional para uma transição mais efetiva. Algumas das opções incluídas não têm efeitos tão claros ou previsíveis, mas a longo prazo podem ser igualmente eficientes e rentáveis.

## 6.4 Operação e Manutenção (O&M)

Uma das principais estratégias para avançar na descarbonização do setor marítimo é a redução do consumo de combustível através do **aumento da eficiência energética**. Esses ganhos de eficiência podem resultar de **melhorias nos motores e sistemas de energia**, do design dos navios ou de **mudanças operacionais**. As **inovações tecnológicas nos motores, como a recirculação dos gases de escape, a temporização variável das válvulas, o aperfeiçoamento dos sistemas de turbo alimentação e o re-desenho das câmaras de combustão**, têm o potencial de **aumentar significativamente a eficiência**, com projeções que indicam um **aumento de 45–48% para mais de 50% nos motores atuais**, enquanto motores mais modernos a gás de dois

tempos já alcançam níveis de **eficiência entre 53% e 55%**. Além disso, cerca de **metade da energia química do combustível é atualmente desperdiçada como calor**, o que pode ser **aproveitado com sistemas de recuperação de calor residual**, capazes de **gerar energia mecânica ou elétrica** e proporcionar **economias de combustível entre 4% e 16%**.

Embora promissoras, essas **tecnologias ainda são de alto custo e complexas de adaptar** a navios já existentes. No campo das operações, o "*slow steaming*" - a prática de **reduzir a velocidade dos navios** - não requer alterações estruturais e pode resultar em **economias de combustível entre 15% e 20% com apenas 10% de redução na velocidade**. Apesar do aumento no tempo de transporte, esta prática já contribuiu para uma redução estimada de 10% a 30% nas emissões da navegação internacional na última década.

O design e os revestimentos do casco também oferecem oportunidades significativas de melhoria. Revestimentos modernos e sistemas que reduzem o atrito com a água, como **pinturas anti-incrustantes e lubrificação por ar**, **podem reduzir o consumo em 5% a 15%**. Em navios novos, a **adoção de materiais mais leves**, cascos mais delgados e proas bulbosas pode proporcionar uma economia adicional de cerca de 10%. As **energias renováveis a bordo** também têm sido exploradas, com o uso de **velas, pipas e painéis solares** para complementar a propulsão ou alimentar sistemas auxiliares. Em navios menores, o **uso de velas e pipas** pode **reduzir o consumo de combustível em até 25%**, enquanto os **painéis solares podem oferecer economias de até 10%**, sobretudo quando combinados em velas solares híbridas.

Para **atingir a meta de redução de 50% nas emissões de CO<sub>2</sub>** estipulada pela Organização Marítima Internacional (IMO), será essencial **combinar várias destas estratégias**. Por exemplo, motores a gás natural que oferecem até 28% de redução nas emissões podem ser combinados com o *slow steaming* (10–20%) e assistência eólica (15–20%) para alcançar a meta de descarbonização de forma viável. (Balcombe et al., 2021)

Uma outra forma de conseguir otimizar a sustentabilidade das embarcações e, conseqüentemente, do setor, passa pelo **uso inteligente de dados** que, quando combinados, conseguem melhorar a eficiência das operações e da navegação. Alguns exemplos de boas práticas dentro da UE passam pelo **uso de dados atmosféricos e oceanográficos para a otimização das rotas**. É possível saber e prever, por exemplo, as **condições como vento e da agitação** e, através disso, perceber como é que algumas rotas podem ser otimizadas. Desta forma é possível tirar partido das condições ambientais – medidas em tempo real ou previstas-, evitando condições adversas que exijam um **maior consumo de combustível**. As bases de dados relativas ao tráfego marítimo e nas zonas portuárias também podem ser úteis para **perceber tendências de crescimento dos portos e as necessidades crescentes**, criando condições logísticas internas, para permitir estratégias de descarbonização que deem resposta à crescente procura, **assegurando a sustentabilidade de todas as operações**.

Outros exemplos, incluem a **recolha de dados das embarcações**, desde medições do vento em tempo real, ao próprio funcionamento da embarcação (e.g. sistemas de manutenção e comportamento no mar; Potência; Fluxo e temperatura do combustível; Velocidade através da água e do fundo; *Draught Sensor* - importantes para perceber a estabilidade e dinâmica da carga, entre outros). Estes dados combinados e analisados ao longo do tempo, permitem uma gestão das operações da embarcação, garantindo, ou permitindo, uma maior eficiência para reduzir emissões e custos. A **performance técnica** também é analisada para garantir a **eficiência e condições de funcionamento**, que também permite o **controlo remoto para garantir a qualidade da viagem** (e.g. casco, hélice, motor, equipamentos auxiliares, acelerações, entre outros). Esta monitorização baseada numa recolha de dados contínua permite ainda uma **otimização da energia, monitorização dos movimentos e previsão da resposta – antecipando o comportamento da embarcação**. Assim é possível ter um controlo e acompanhamento em terra do estado da embarcação em alto mar, **ajustando as respostas ao conhecimento do problema**.

## 7 O Papel Estratégico das Infraestruturas Portuárias na Transição Energética

Conforme foi descrito anteriormente, **o setor naval tem pela frente uma profunda transformação** de forma a dar resposta aos compromissos internacionais de descarbonização. Esta transição não pode ser encarada apenas do ponto de vista da frota. As infraestruturas portuárias, enquanto interfaces fundamentais entre o transporte marítimo e os modais terrestres, desempenham um papel estratégico na viabilização da redução de emissões de carbono. Assim, **a descarbonização dos portos é simultaneamente um fator habilitador e um catalisador da transformação sustentável do transporte marítimo global**.

Para além das atividades mais comuns de cargas, logísticas e apoio à indústria naval, os maiores portos também apoiam indústria de alto consumo energético como a indústria química, cimento e manufatura. São ainda

desempenhados papéis no setor energético, através da produção, importação e exportação de energia, bem como da gestão de redes elétricas. Todos estes “clusters” industriais oferecem diversas oportunidades para a descarbonização e a transição para a energia limpa.

O setor portuário tem ainda uma grande variedade de fontes de emissão de carbono, seja nas atividades logísticas (p.ex. movimentação de contentores etc.), o consumo de eletricidade não renovável para alimentar as infraestruturas (p.ex. iluminação e diversas máquinas), além de outras emissões indiretas provenientes dos veículos que utilizam os portos para entregar e carregar cargas. Todas estas atividades são oportunidades de descarbonização, utilizando a eletrificação e a energia renovável como fontes principais. Aliada a esta transição, acrescenta-se ainda uma maior eficiência energética, tecnologias inteligentes para otimizar o transporte e a entrega, e fornecimento de eletricidade em terra para navios quando atracados.

As atividades de manutenção dos portos são também uma oportunidade para a descarbonização, usando energia renovável e máquinas movidas a energia, deixando o diesel. Dento da UE é obrigatório fazer o reporte de impactos, incluindo emissões, de empresas com mais de 500 funcionários, sendo que o número de pequenas empresas que já o estão a começar a fazer tem vindo aumentar.

Assim, entre as principais linhas de atuação para a descarbonização portuária destacam-se:

- **Eletrificação das operações** (incluindo a instalação de sistemas Onshore Power Supply - OPS);
- Desenvolvimento de **infraestruturas para o armazenamento e abastecimento de combustíveis alternativos** (como LNG, hidrogénio verde, amónia, entre outros);
- Integração de **fontes de energia renovável** na matriz energética do porto;
- **Digitalização, automação e monitorização inteligente** para otimização energética;
- Fomento à **intermodalidade**, promovendo soluções logísticas mais sustentáveis.

Existem várias soluções para otimizar as operações de logística em zonas portuárias, como as seguintes:

- Fornecer informações em tempo real para processos como controlo de contentores, planeamento de navios, gestão de terminais, planeamento de cais, entre outros, permitindo maior eficiência e reduzindo os custos operacionais das operações logísticas de carga;
- Redes de sensores que permitam a monitorização remota de máquinas para prevenir avarias dispendiosas, preparar cronogramas mais eficientes para otimizar rotas de entrega e economizar energia ao agrupar espaços em uso (por exemplo, em armazéns portuários), além de identificar fugas de energia;
- Utilizar contentores de transporte dobráveis, que ocupam 75% menos espaço do que os contentores tradicionais, reduzindo os custos de transporte de contentores vazios e, conseqüentemente, diminuindo as emissões de carbono;
- Aceder a plataformas de otimização de rotas, reduzindo a pegada de carbono;
- Utilizar tecnologias de armazenamento de energia, que podem ser utilizadas em guindastes portuários, permitindo a recuperação de energia durante as operações de descida e travagem, e que pode ser reaproveitada para elevação.

Como medida de complementaridade, existem projetos que visam a produção de energia para os processos industriais através de fontes renováveis, como, por exemplo:

- **Heliac:** Campos solares baseados em lentes de baixo custo e alta eficiência que concentram a energia do sol como uma lupa, sendo capazes de gerar calor de até 400°C. Esse calor pode alimentar diversos processos em instalações industriais que operam dentro de portos. O vapor gerado também pode ser utilizado para acionar turbinas e gerar eletricidade.
- **MEVA:** Utilizando biomassa à base de madeira ou resíduos agrícolas, esta tecnologia converte esses resíduos em biogás renovável, que pode servir como combustível (calor ou energia) para processos industriais, como o fornecimento de energia para fábricas químicas localizadas em portos.
- **Naoden:** desenvolve centrais elétricas modulares e compactas que convertem biomassa à base de madeira, resíduos verdes e caroços e cascas de frutas em calor e eletricidade, sendo capazes de alimentar alguns processos industriais

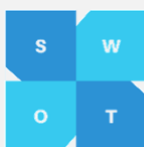
### Caso de Estudo 3 | SWOT – Porto Internacional de Portsmouth (UK)

#### FORÇAS

- Compromisso com neutralidade carbónica até 2030
- Maior instalação de painéis solares num porto do Reino Unido
- Sistema PESO com IA para gestão energética inteligente
- Uso de digital twin para otimização do armazenamento
- Redução do impacto na qualidade do ar

#### OPORTUNIDADES

- Tornar-se referência em sustentabilidade portuária
- Acesso a fundos verdes e europeus
- Exportação de soluções tecnológicas
- Atração de operadores com foco ESG
- Novos serviços em monitorização e energia



#### FRAQUEZAS

- Dependência de tecnologia complexa e recente
- Investimento inicial elevado - Baixa capacidade de inovação tecnológica no setor privado nacional
- Integração difícil com sistemas antigos
- Escalabilidade ainda por comprovar

#### AMEAÇAS

- Concorrência de portos sustentáveis
- Possíveis falhas tecnológicas
- Mudanças em políticas de apoio
- Instabilidade nos mercados de energia

**A descarbonização do setor naval não será viável sem a transformação paralela e articulada dos portos.** Ações coordenadas ao nível da infraestrutura enquanto motor de inovação, sustentabilidade e competitividade são necessárias. A ambição de atingir a neutralidade carbónica até 2035 é audaciosa, mas concretizável com investimento, visão estratégica e articulação entre *stakeholders* públicos e privados. Seja através da eletrificação, do hidrogénio ou da bioenergia, os portos serão um elemento-chave para disponibilizarem estações de carregamento adaptadas a novos navios movidos a combustíveis mais sustentáveis. À medida que o setor naval evolui, os portos que estiverem preparados para fornecer energia limpa, apoiar combustíveis alternativos e garantir operações digitais e eficientes estarão melhor posicionados para liderar esta nova era da logística marítima.

## 8 Conclusões e Perspetivas Futuras

Nas últimas décadas, **descarbonizar o setor marítimo e naval tem sido um objetivo comum.** É notório o esforço por parte do **setor privado**, mas também por parte das diversas partes interessadas (*stakeholders*), nomeadamente no que diz respeito à **UE e IMO**, que têm alcançado avanços legislativos que incentivam a transição energética do setor.

É notória a tendência crescente de nova **legislação que promove e regula boas práticas** em paralelo com o **desenvolvimento de energias e tecnologias que o asseguram.**

No setor privado, foram identificados vários casos de boas práticas, como os exemplos ilustrados no norte da Europa, onde se verifica a colaboração entre setor privado, academia e governação - o que permite traçar linhas de cooperação em prole de objetivos comuns. A médio-longo prazo, esta estreita **colaboração e cooperação entre vários intervenientes é vista com uma peça central e fundamental no sucesso da descarbonização.**

Dentro das boas práticas identificadas que se alinham com aquilo que são as indicações legislativas europeias e mundiais, a transição para **combustíveis alternativos** apresenta-se como uma das componentes centrais no processo. Assim, foram identificadas algumas das alternativas que podem ser mais viáveis para o setor marítimo, como a Amónia, Biocombustíveis, Gás Natural Liquefeito, Eletricidade, Metanol, Nuclear, Hidrogénio e Combustíveis Sintéticos. No entanto, dentro destas opções, não é ainda possível identificar a alternativa ideal.

Para além dos combustíveis alternativos, também foram identificadas medidas adicionais que podem, e devem, constar no processo de descarbonização do setor. **Dentro destas**, foram identificadas medidas a nível de **design** (ex: motores diferentes) e **O&M** (ex: recirculação dos gases de escape, a temporização variável das válvulas, outros).

A **partilha de conhecimento entre armadores** é uma ótima forma de promover uma transição efetiva da frota. Os vínculos destes armadores com a economia local e ambiente também resultam numa consciência ambiental, que se traduz numa disposição para serem pioneiros em inovação ambiental no setor marinho.

A descarbonização da frota naval internacional exigirá o compromisso do setor privado, setor público, e universidades ou institutos de investigação. Apesar dos esforços da UE e da IMO em **harmonizar legislação para a descarbonização**, são precisas mais **linhas de financiamento** que efetivem esta concretização.

**O caminho não deve ser feito com a certeza de uma solução única e universal para descarbonização, mas sim procurar vários pontos e soluções de melhoria que, juntos, tenham efeitos maiores e mais duradouros em situações específicas.**

A transição e descarbonização - seja através da utilização de combustíveis alternativos, alterações de design, reciclagem e circularidade de navios, ou otimização das operações - vai requerer que os **portos e a indústria de construção, reparação e manutenção também evoluam e acompanhem os seus clientes a conseguir responder a este imperativo**

## 9 REFERÊNCIAS

- Aakko-Saksa, P., & Lehtoranta, K. (2019). *Ship emissions in the future: review*. VTT Technical Research Center of Finland.
- Arnaiz del Pozo, C., Cloete, S., & Jiménez Álvaro, Á. (2022). Techno-Economic Assessment of Long-Term Methanol Production from Natural Gas and Renewables. *Energy Convers. Manag.*, 266, 115785.
- Balcombe, P., Staffell, I., Garcia Kerdan, I., Speirs, J. F., Brandon, N. P., & Hawkes, A. D. (2021). How can LNG-fuelled ships meet decarbonisation targets? An environmental and economic analysis. *Energy*, 227, 120462.
- Bei, Z., Wang, J., Li, Y., Wang, H., Li, M., Qian, F., & Xu, W. (2024). Challenges and solutions of ship power system electrification. *Energies*, 17(13), 3311.
- Chica, M., Hermann, R. R., & Lin, N. (2023). Adopting different wind-assisted ship propulsion technologies as fleet retrofit: an agent-based modeling approach. *Technol Forecast Soc Change*, 192, 122559.
- Delzendehrooy, F., Akhavan-Safar, A., Barbosa, A. Q., Beygi, R., Cardoso, D., Carbas, R. J. C., Marques, E. A. S., & da Silva, L. F. M. (2022). Review on structural joining techniques in the marine industry. *FIBRE4YARDS Project, INEGI*.
- Directorate of Fisheries. (2021). *Lønnsomhetsundersøkelse for Fiskeflåten 2019: Technical Report 2020/6861*. Directorate of Fisheries, Bergen, Norway.
- DNV. (2010). *Nuclear powered ships – a feasibility study*. <https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast/>
- DNV. (2023). *Maritime Forecast to 2050 – 2023 Edition*. <https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast/>
- Duraisamy, G., & Rangasamy, M. (2020). A Comparative Study on Methanol/Diesel and Methanol/PODE Dual Fuel RCCI Combustion in an Automotive Diesel Engine. *Renew. Energy*, 145, 542–556.
- EAF0. (2024). *Maritime*. European Alternative Fuels Observatory. <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/maritime-sea>
- EMSA & EEA. (2025). *European Maritime Transport Environmental Report 2025*. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/maritime-transport-2025>
- European Maritime Safety Agency. (2023). *Potential of ammonia as fuel in shipping*. <https://emsa.europa.eu/publications/reports/item/4833-potential-of-ammonia-as-fuel-in-shipping.html>
- Feenstra, M., Monteiro, J., van den Akker, J. T., Abu-Zahra, M. R. M., Gilling, E., & Goetheer, E. (2019). Ship-based carbon capture onboard of diesel or LNG-fuelled ships. *Int J Greenh Gas Control*, 85, 1–10.
- Finland's Ministry of Transport and Communications. (2021). *Government Resolution on reducing greenhouse gas emissions from maritime and inland waterway transport*. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/LVM\\_2021\\_11.pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/LVM_2021_11.pdf)
- Finnish Government. (2022). *Maritime Policy Action Plan*. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/164192>
- Fridstrøm, L., Tomasgard, A., Eskeland, G. S., Espegren, K. A., Rosenberg, E., Helgesen, P. I., ... & Graabak, I. (2019). *Decarbonization of transport: A position paper prepared by FME MOZEES and FME CenSES*. <https://mozees.no/wp-content/uploads/2019/01/Decarbonization-of-transport.pdf>
- Guo, Z., Li, T., Dong, J., Chen, R., Xue, P., & Wei, X (2011). Combustion and Emission Characteristics of Blends of Diesel.
- Habibic, A. (2023). EverLoNG prototype ship-based carbon capture equipment soon to be installed on TotalEnergies' LNG carrier. *Offshore Energy*. <https://www.offshore-energy.biz/everlong-prototype-ship-based-carbon-capture-equipment-soon-to-be-installed-on-totalenergies-lng-carrier/>
- IMO. (2018). *EEXI and CII - ship carbon intensity and rating system*. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/EEXI-CII-FAQ.aspx>
- IMO. (2020). *Fourth IMO greenhouse gas study 2020*. <https://www.imo.org/en/ourwork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>
- IMF. (2024). *Key challenges faced by fossil fuel exporters during the energy transition (Staff Climate Note 2024/004)*. <https://www.imf.org/en/Publications/staff-climate-notes/Issues/2024/03/26/Key-Challenges-Faced-by-Fossil-Fuel-Exporters-during-the-Energy-Transition-546066>

- International Transport Forum. (2018). *Decarbonising maritime transport: The case of Sweden (Policy Papers No. 46)*. OECD. <https://doi.org/10.1787/99514381-en>
- Komendantova, N., & Neumueller, S. (2023). The impact of energy transition on the geopolitical importance of oil-exporting countries. *World*, 4(3), 383–398.
- Kondratenko, A. A., Zhang, M., Tavakoli, S., Altarriba, E., & Hirdaris, S. (2025). Existing technologies and scientific advancements to decarbonize shipping by retrofitting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 212, 115430.
- Lindstad, E., Lagemann, B., Riialand, A., Gamlem, G. (2021). Reduction of maritime GHG emissions and the potential role of E-fuels. *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.*, 101, 103075.
- Lund, H., Mathiesen, B. V., Thellufsen, J. Z., Sorknæs, P., Chang, M., Kany, M. S., & Skov, I. R. (2021). *IDAs Klimasvar 2045: Sådan bliver vi klimaneutrale*. Ingeniørforeningen IDA.
- Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping. (2022). *E-Ammonia Production from Nuclear Power*. <https://cms.zerocarbonshipping.com/media/uploads/publications/E-Ammonia-Production-from-Nuclear-Power.pdf>
- Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping. (2024). *Preparing tanker vessels for conversion to green fuels*. <https://cms.zerocarbonshipping.com/media/uploads/documents/Preparing-Tanker-Vessels-for-Conversion-to-Green-Fuels.pdf>
- Maritime CleanTech. (2025). *World's first electric ferry celebrates 10 years of success*. <https://maritimecleantech.no/2025/02/18/worlds-first-electric-ferry-celebrates-10-years-of-success/>
- Ni, P., Wang, X., & Li, H. (2020). A Review on Regulations, Current Status, Effects and Reduction Strategies of Emissions for Marine Diesel Engines. *Fuel*, 279, 118477.
- Norled. (2025). *MF Ampere markerer 10-årsjubileum – en verdensnyhet som startet en grønn revolusjon*. <https://www.norled.no/en/mf-ampere-markerer-10-arsjubileum-en-verdensnyhet-som-startet-en-gronn-revolusjon/>
- Norwegian Government. (2019). *The Government's action plan for green shipping*. <https://www.regjeringen.no/en/dokumenter/the-governments-action-plan-for-green-shipping/id2660877/>
- Nuttall, P., & Kaitu, J. (2016). The magnus effect and the flettner rotor: potential application for future oceanic shipping. *The Journal of Pacific Studies*, 36.
- Ros, J. A., Skylogianni, E., Doedée, V., van den Akker, J. T., Vredeveltdt, A. W., & Linders, M. J. G., et al. (2022). Advancements in ship-based carbon capture technology on board of LNG-fuelled ships. *Int J Greenh Gas Control*, 114, 103575.
- Rubino, F., Nistico, A., Tucci, F., & Carlone, P. (2020). Marine application of fiber reinforced composites: a review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8, 26.
- S&P Global Commodity Insights. (2023). *Fragmented markets from geopolitical conflict threaten to throw energy transition off track*. <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/latest-news/crude-oil/100323-fragmented-markets-from-geopolitical-conflict-threaten-to-throw-energy-transition-off-track>
- Sekera, J., & Lichtenberger, A. (2020). Assessing carbon capture: public policy, science, and societal need. *Biophys Econ Sust*, 5, 14.
- Silberschmidt, N., Tasker, D., Pappas, T., & Johannesson, J. (2016). *Silverstream® system – air lubrication performance verification and design development*.
- Silva, J. P., & Oliveira, M. R. (2022). Estratégias de descarbonização eficiente para o setor de transportes dinamarquês. *Journal of Sustainable Transport*, 15(3), 150-165.
- Sønnervik, H. H., Msakni, M. K., & Schütz, P. (2024). Decarbonizing the Norwegian fishery fleet – Strategic fleet renewal with environmental considerations. *Maritime Transport Research*, Norwegian University of Science and Technology.
- Sollai, S., Porcu, A., Tola, V., Ferrara, F., & Pettinau, A. (2023). Renewable Methanol Production from Green Hydrogen and Captured CO<sub>2</sub>: A Techno-Economic Assessment. *J. CO2 Util.*, 68, 102345.
- Steen, M., Bjerkan, K. Y., Hansen, L., & Seter, H. (2024). Implementing decarbonisation measures in Norwegian ports. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 23, 100993

Author: **HAEDES Portugal**

Date: May 2025



**RNCZ**  
Roteiro Naval Carbono Zero

