



ESCOLA SUPERIOR NÁUTICA INFANTE D. HENRIQUE

## **Mestrado em Engenharia de Máquinas Marítimas**

# **DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA INDÚSTRIA MARÍTIMA: UMA ANÁLISE TÉCNICO-ECONÓMICA COMPARATIVA ENTRE AS ATUAIS OPÇÕES DO OPERADOR**

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia de Máquinas Marítimas

Orientador – Prof. Doutor Luís Filipe Baptista  
Co-orientador – Prof. Doutor Sérgio Ribeiro e Silva

**Autor:** Juliana Costabile Zanforlin de Almeida

Paço de Arcos, setembro de 2024



**ESCOLA SUPERIOR NÁUTICA INFANTE D. HENRIQUE**



## DECLARAÇÃO DE AUTENTICIDADE

A presente tese foi realizada pela aluna Juliana Costabile Zanforlin de Almeida, aluna do curso de Mestrado de Engenharia de Máquinas Marítimas, no ano letivo de 2023/2024.

A aluna declara que:

- (i) Todo o conteúdo das páginas que se seguem é de autoria própria, decorrendo do estudo, investigação e experiência profissional própria.
- (ii) Quaisquer materiais utilizados para produção deste trabalho não colocam em causa direitos de Propriedade Intelectual de terceiras entidades ou sujeitos.
- (iii) Este trabalho, as partes dele, não foi previamente submetido como elemento de avaliação nesta ou outra instituição de Ensino/formação.
- (iv) Foi tomado conhecimento das definições relativas ao regime de avaliação sob o qual este trabalho será avaliado, pelo que se atesta que o mesmo cumpre as orientações que lhe foram impostas.
- (v) Foi tomado conhecimento de que este trabalho deve ser submetido em versão digital e que esta versão poderá ser utilizada em atividades de deteção eletrónica de plágio, por processos de análise comparativa com outros trabalhos, no presente e/ou futuro.

Paço de Arcos, 05 de setembro de 2024

  
(Assinatura)





## AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação representa um marco significativo no meu percurso académico e profissional, sendo um momento de grande importância que gostaria de dedicar a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a obtenção deste objetivo.

Em primeiro lugar, expresso minha profunda gratidão aos meus pais, por sempre acreditarem em mim e me apoiarem incondicionalmente em todas as etapas da minha vida. Sem o amor, os conselhos e a paciência de vocês, nada disto seria possível.

Aos meus orientadores, os professores Luís Filipe Baptista e Sérgio Ribeiro e Silva, por sua orientação, paciência e sábias palavras, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Em especial, agradeço aos professores da ENIDH, por toda a sua dedicação, empenho, disponibilidade e orientação que me concederam ao longo de todo o período de Mestrado.

Agradeço igualmente ao Chefe de Máquinas do navio M/S Carnival Sunrise, Sr. Kresimir Perkovic e ao Oficial Eletrotécnico, Sr. Sime D., pelo apoio e imensos conhecimentos partilhados durante os embarques, sendo verdadeiros modelos de profissionais os quais tenho como exemplos.

Por fim, agradeço ao meu marido, que me deu força nos momentos mais difíceis e comemorou comigo cada pequena vitória. Seu amor e compreensão foram pilares essenciais durante todo o processo.

A todos, a minha eterna gratidão.





## RESUMO

Nas últimas duas décadas, os anos mais quentes já registados, acompanhados pela intensificação de eventos climáticos extremos, intensificaram as preocupações quanto aos impactos das alterações climáticas sobre o meio ambiente e a saúde humana. Diante desse cenário, a mitigação desses efeitos tornou-se uma prioridade global, mobilizando diversos setores, com destaque para a indústria marítima, responsável por 2-3% das emissões globais de dióxido de carbono.

O conceito de descarbonização, despontado no início do século XXI como resposta à crescente emissão de gases de efeito de estufa, passou a orientar políticas internacionais voltadas à sustentabilidade. No setor marítimo, esse conceito concretiza-se por meio da implementação de metas rigorosas estabelecidas pela Organização Marítima Internacional, que visam à redução progressiva das emissões e à promoção de uma navegação cada vez mais sustentável. Estratégias como a adoção de combustíveis alternativos, o aprimoramento da eficiência energética e o uso de tecnologias emergentes, juntamente com a digitalização e a automação, constituem pilares dessa transição. Nesse contexto, o apoio institucional, a cooperação intersectorial e o investimento contínuo em pesquisa e desenvolvimento são indispensáveis para viabilizar a infraestrutura necessária à transformação do setor.

O presente estudo investiga as alternativas energéticas limpas mais viáveis para o setor marítimo, bem como as implicações técnico-económicas de tecnologias atualmente disponíveis. Entre essas tecnologias, destacam-se as torres de lavagem, que, embora possam contribuir para a mitigação de determinadas emissões, apresentam limitações operacionais relevantes, como o aumento do consumo energético e o possível deslocamento de poluentes.

Além disso, identificam-se desafios significativos na adaptação da frota existente, especialmente no caso de navios mais antigos. A transição energética requer, portanto, uma avaliação abrangente das características técnicas, dos custos associados, da infraestrutura disponível e da necessidade de capacitação contínua das tripulações.

Quando integradas, essas ações podem promover a otimização operacional, mensurável por meio de indicadores como índices de eficiência energética e intensidade de carbono. Diante da rápida evolução do setor, torna-se essencial um esforço coordenado para assegurar que as futuras gerações de navios e profissionais estejam preparadas para enfrentar os desafios climáticos globais e contribuir para a meta de descarbonização até 2050.

**Palavras-Chaves:** Biocombustíveis; Descarbonização; Eficiência Energética, Sustentabilidade, Regulamentações, Indústria Marítima.





## ABSTRACT

Over the past two decades, the world has experienced the warmest years ever, accompanied by increasingly extreme weather. Growing concerns over the impacts of climate change on environmental and human health impacts. In response, climate change mitigation has emerged as a global top priority, mobilizing various sectors, with particular focus on the maritime industry, which account for approximately 2-3% of global carbon dioxide emissions.

The concept of decarbonization, which gained prominence in the early 21st century as a response to rising greenhouse gas emissions, has since guided global sustainability policies. In the maritime industry, it is reflected in the ambitious emission-reduction targets established by the International Maritime Organization, aimed at enabling a gradual shift toward sustainable industry. Core strategies include the adoption of alternative fuels, improvements in energy efficiency, and the integration of emerging technologies, enhanced by digitalization and automation. During the process, intersectoral collaboration and government support are equally vital for transitioning to a decarbonized industry.

This paper investigate the technical and economic feasibility of clean energy alternatives in the sector, while assessing the implications of currently available abatement technologies. Among these, exhaust gas cleaning systems - commonly referred to as scrubbers - are examined for their dual potential: on one hand, their capacity to reduce specific atmospheric emissions; on the other, their operational limitations, including increased energy consumption and the potential displacement of pollutants.

Furthermore, this study identifies substantial challenges related to the retrofitting of the existing fleet, particularly ageing vessels, within the broader context of maritime decarbonization. A successful energy transition requires an evaluation of technical factors, cost, infrastructure readiness, and the continuous professional development of seafarers. When effectively integrated, these elements can drive significant operational optimization, measurable through energy efficiency and carbon intensity metrics.

In light of the rapid regulatory, technological, and environmental transformations shaping maritime transport, this research highlights the critical importance of cross-sectorial engagement. Such coordination is essential to ensure that future generations of ships and professionals are equipped to achieve the global decarbonization goals set for 2050.

**Keywords:** Biofuels; Decarbonization; Energy Efficiency, Sustainability, Regulations, Shipping Industry.





## ÍNDICE GERAL

<b>DECLARAÇÃO DE AUTENTICIDADE .....</b>	<b>I</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>III</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS .....</b>	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. EVOLUÇÃO DAS REGULAMENTAÇÕES SOBRE POLUIÇÃO DE NAVIOS .....</b>	<b>5</b>
2.1. ORGANIZAÇÃO MARÍTIMA INTERNACIONAL.....	5
2.2. UNIÃO EUROPEIA.....	6
2.3. ESTADOS UNIDOS .....	8
2.4. CHINA .....	10
<b>3. OS CAMINHOS PARA A SUSTENTABILIDADE: A VIABILIDADE DOS COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS .....</b>	<b>13</b>
3.1. METANOL – ETANOL .....	14
3.2. AMONÍACO.....	19
3.3. HIDROGÉNIO .....	32
3.4. CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL .....	41
3.5. LNG.....	52
<b>4. OUTRAS MEDIDAS PARA A SUSTENTABILIDADE DO TRANSPORTE MARÍTIMO ..59</b>	
4.1. MEDIDAS OPERACIONAIS .....	60
4.1.1. Redução de Velocidade.....	60
4.1.2. Otimização de Rotas .....	61
4.1.3. Conversores de Frequência Variável .....	61
4.1.4. Projeto do navio .....	62
4.2. TECNOLOGIAS ATUALMENTE DISPONÍVEIS.....	62
4.2.1. Captura e Armazenamento de Carbono .....	62
4.2.1.1. Solvente de Amina.....	64
4.2.1.2. Hidróxido de Cálcio.....	66
4.2.1.3. Óxido de Cálcio .....	67
4.2.1.4. Captura de Carbono Criogénica.....	68
4.2.2. Torres de Lavagem (Scrubbers).....	69
4.2.3. Lubrificação a Ar .....	70
4.3. PANORAMA DOS DESAFIOS E OPORTUNIDADES .....	72
4.3.1. Incertezas Consoante ao Uso de Combustíveis Sustentáveis.....	72
4.3.2. Corredores Sustentáveis.....	73
<b>5. CASO DE ESTUDO: IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA NUM NAVIO DE CRUZEIRO .....</b>	<b>77</b>



5.1. APRESENTAÇÃO DA INVESTIGAÇÃO.....	77
5.2. CONTRIBUIÇÕES ADVINDAS DO ESTUDO DE CASO .....	78
5.3. ENQUADRAMENTO TEÓRICO .....	78
5.4. RECOLHA DE DADOS .....	80
5.5. METODOLOGIA DO ESTUDO.....	81
5.5.1. Fatores de Emissão.....	85
5.5.1.1. Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) - Fator de emissão baseado em combustível .....	87
5.5.1.2. Óxidos de Enxofre (SO <sub>x</sub> ) - Fator de emissão baseado no combustível .....	88
5.5.1.3. Óxidos de Azoto (NO <sub>x</sub> ) - Fator de emissão baseado na energia.....	88
5.5.1.4. Partículas (PM10 e PM2,5) - Fator de emissão baseado em energia.....	89
5.6. RESULTADO DOS CÁLCULO DAS EMISSÕES.....	90
5.6.1. Análise de Potência e Combustível.....	93
5.6.2. Cálculo do EEXI.....	94
5.6.3. Considerações acerca do CII.....	96
5.7. VIABILIDADE FINANCEIRA DO PROJETO.....	99
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>111</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>115</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>125</b>
APÊNDICE I - CÁLCULO DO EEXI DO NAVIO EM ESTUDO .....	127
APÊNDICE II - CÁLCULO DO CII DO NAVIO EM ESTUDO .....	129
<b>ANEXOS.....</b>	<b>131</b>
ANEXO I - TIPOS E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL .....	133
ANEXO II - DATASHEET DAS TORRES DE LAVAGEM ECOSPRAY .....	135
ANEXO III - NAVIO ESTUDADO EM PROCESSO FINAL DE DOCAGEM .....	147
ANEXO IV - CURVA DE POTÊNCIA x VELOCIDADE UTILIZADA PARA O CÁLCULO DO EEXI .....	149
ANEXO V - PARÂMETROS PARA DETERMINAÇÃO DOS VALORES DE REFERÊNCIA PARA O NAVIO EM ESTUDO.....	151
ANEXO VI – FATOR DE REDUÇÃO DO EEXI RELATIVO AO EEDI.....	153
ANEXO VII - PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A DETERMINAÇÃO DAS LINHAS DE REFERÊNCIA DO ANO DE 2019, UTILIZADOS NO CÁLCULO DO CII.....	155
ANEXO VIII - FATOR DE REDUÇÃO (Z%) DO CII EM RELAÇÃO ÀS LINHAS DE REFERÊNCIA DE 2019 .....	157
ANEXO IX - ESQUEMAS P&ID CORRESPONDENTES À INSTALAÇÃO DA TORRE DE LAVAGEM NO DG#1 DO NAVIO EM ESTUDO .....	159
.....	161
ANEXO X - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO DE INJEÇÃO DE COMBUSTÍVEL.....	169



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Consumo de Combustíveis Alternativos na Frota Mundial por Números de Navios e Arqueação Bruta. ....	3
Figura 2. Potencial de Redução de emissões de gases de efeito de estufa (GEE) de Tecnologias que Podem Contribuir para a Descarbonização do Transporte Marítimo. ....	13
Figura 3. Variação do Preço do Metanol nos Últimos 20 anos, em Comparação com outros Combustível Marítimos .....	17
Figura 4. Rotas de Produção do Amoníaco Cinzento, Azul e Verde. ....	22
Figura 5. Procura Esperada de Amoníaco até 2050. ....	29
Figura 6. Custos Estimados Da Produção De Amoníaco em Função dos Preços do Gás e da Eletricidade. ....	30
Figura 7. Emissão de Carbono com e sem o uso de CCS/CCUS em Comparação com o Gasóleo Marítimo .....	40
Figura 8. Célula de Combustível Típica de Membrana de Protões (PEM). ....	43
Figura 9. Custo Diário da Célula de Combustível de Hidrogénio. ....	47
Figura 10. Emissões de Carbono para cada Tipo de Propulsão. ....	51
Figura 11. Tecnologias de Captura de Carbono. ....	62
Figura 12. Descrição e Disponibilidade das Tecnologias de Captura de Carbono. ....	63
Figura 13. Cálculo da Redução de Carbono. ....	65
Figura 14. Diagrama da Torre de Lavagem com Captura de Carbono Baseado na Absorção Química de Amino. ....	66
Figura 15. Esquema de uma Torre de Lavagem com Captura de Carbono por Adsorção de Hidróxido de Cálcio. ....	67
Figura 16. Diagrama da Captura de Carbono Criogénica. ....	68
Figura 17. Número de Torres de Lavagem Instaladas por Tipo de Navio até agosto de 2024. ....	69
Figura 18. Opções de Torres de Lavagem .....	70
Figura 19. Corredores Marítimos Sustentáveis. ....	74
Figura 20. Perfil Operacional do Navio. ....	81
Figura 21. Crescimento Anual da Instalação das Torres de Lavagem na frota Mundial. ....	82
Figura 22. Metodologia do Estudo. ....	82
Figura 23. Fluxo de Caixa e Período de Retorno de Investimento dos Projetos em Análise. ....	103





## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Estimativa de CAPEX de Modernização de um Navio que consome Metanol (MeOH).....	16
Tabela 2. Estimativa de CAPEX para um navio novo e para adaptação para o consumo de MeOH....	18
Tabela 3.Comparação da Eficiência Esperada para Cada Meio de Produção do Amoníaco.....	23
Tabela 4. CAPEX Aproximado para Adaptação do Navio da Grieg Star ao consumo do Amoníaco ..	24
Tabela 5. Desempenho do Amoníaco Produzido a Partir de Gás Natural, Eletrólise com Energia Renovável ou para uso em Células de Combustível.....	25
Tabela 6. CAPEX do Motor e Tanques de Armazenamento de Acordo com Tipo de Navio e Potência Instalada.....	27
Tabela 7. Custos de Adaptação do Motor ICE ao Amoníaco e Custos Adicionais.....	29
Tabela 8. Custos Operacionais e CAPEX de cada uma das Opções .....	38
Tabela 9. CAPEX de Adaptação de um Navio à Célula de Combustível de Hidrogénio .....	47
Tabela 10. Características Principais do navio Porta - Contentores.....	48
Tabela 11. CAPEX do navio porta-contentor (Sistema de Propulsão & Tanques de Armazenamento) .....	50
Tabela 12. OPEX para cada tipo de Propulsão.....	50
Tabela 13. CAPEX de Conversão de um Motor Bicomcombustível para LNG .....	55
Tabela 14. Cálculo do CAPEX para Novas Construções e para a Conversão de um Navio à LNG.....	55
Tabela 15. Custo Estimado de Conversão de um Motor Bicomcombustível a LNG.....	56
Tabela 16. Limites de Emissões de Enxofre.....	69
Tabela 17. Características Principais do Navio a ser Estudado.....	80
Tabela 18. Consumo Específico de Combustível (SFC) .....	87
Tabela 19. Fatores de Emissão para Diferentes Tipos de Combustível e o seu Teor de Carbono .....	87
Tabela 20. Fatores de Emissão NOx por Velocidade e Idade do Motor .....	88
Tabela 21. Fatores de Emissão [Kg de poluente por ton de fuel].....	89
Tabela 22. Consumo de Combustível Equivalente Mensal [ton] .....	90
Tabela 23. Emissão de Poluentes [tons] .....	91
Tabela 24. Cálculo do Custo de Redução de CO <sub>2</sub> Relativo a um VLCC .....	93
Tabela 25. Comparação da Demanda Energética e do Consumo de Combustível nos Cenários Analisados.....	94
Tabela 26. Cálculo do CII do Navio em Estudo .....	98
Tabela 27. Quantificação do Impacto das Medidas de Eficiência Energética no Navio em Estudo .....	99
Tabela 28. CAPEX da Instalação das Torres de Lavagem no Navio em Estudo .....	100
Tabela 29. CAPEX da Implementação de Tecnologias de Eficiência Energética e das Torres de Lavagem .....	100



Tabela 30. Análise Comparativa dos Indicadores Financeiros com Taxas de Desconto de 8%, 10% e 12% .....	102
Tabela 31. Análise Comparativa dos Custos de Instalação da Tecnologia CCS com a Estimativa de Valores Previstas para o Sistema de Comércio de Emissões de Poluentes EU-ETS .....	104
Tabela 32. Comparação de CAPEX para Adaptação de Navios ao LNG e às Torres de Lavagem ....	109
Tabela 33. Comparação de CAPEX para adaptação do Navio MS Nord Butterfly para consumo do LNG e para instalação das torres de lavagem.....	109
Tabela 34. Estimativa de CAPEX para adaptação para consumo do LNG por Alongamento Comparativamente a uma Nova Construção .....	110



## ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

ATR	Reforma Autotérmica
BDR	Bolhas de Ar ( <i>Bubble Air Reduction</i> )
CAPEX	Despesas de capital ( <i>capital expenditure</i> )
CCS	Captura e Armazenamento de Carbono ( <i>Carbon Capture and Storage</i> )
CII	Indicador de Intensidade de Carbono ( <i>Carbon Intensity Indicator</i> )
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
DME	Éter Dimetílico ( <i>Dimethyl Ether</i> )
ECA	Área de Controlo de Emissões ( <i>Emission Control Area</i> )
EEDI	Índice de Eficiência Energética ( <i>Energy Efficiency Design Index</i> )
EEXI	Índice de Eficiência Energética para Navios Existentes ( <i>Energy Efficiency Existing Ship Index</i> )
EMSA	Agência Europeia de Segurança Marítima ( <i>European Maritime Safety Agency</i> )
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América ( <i>U.S Environmental Protection Agency</i> )
ETS	Sistema de Comércio de Emissões ( <i>Emission Trading System</i> )
EU-MRV	Monitorização, Comunicação e Verificação da União Europeia (EU Monitoring, Reporting and Verification)
FID	Dispositivo de Melhoria do Combustível ( <i>Fuel Improvement Device</i> )
GEE	Gases de Efeito de Estufa
HFO	Combustível Pesado ( <i>Heavy Fuel Oil</i> )
HVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado ( <i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i> )
ICE	Motores de Combustão Interna ( <i>Internal Combustion Engine</i> )
IGF Code	Código internacional de segurança para navios que utilizam gases ou outros combustíveis com baixo ponto de ignição
IMO	Organização Marítima Internacional ( <i>International Maritime Organization</i> )



IMO-DCS	Sistema de Coleta de dados de Combustíveis da IMO ( <i>Data Collection System</i> )
IRA	Lei de Redução da Inflação ( <i>Inflation Reduction Act</i> )
ISO	Organização Internacional de Padronização ( <i>International Organization for Standardization</i> )
ITF	Fórum Internacional do Transporte ( <i>International Transport Forum</i> )
LNG	Gás Natural Liquefeito ( <i>Liquefied Natural Gas</i> )
LPG	Gás Liquefeito do Petróleo ( <i>Liquefied Petroleum Gas</i> )
MDO	Óleo Diesel Marítimo ( <i>Marine Diesel Oil</i> )
MeOH	Metanol
MEPC	Comitê de Proteção do Meio Ambiente Marítimo ( <i>Marine Environmental Protection Committee</i> )
MGO	Gasóleo Marítimo ( <i>Marine Gas Oil</i> )
MSA	Administração de Segurança Marítima Chinesa ( <i>China Maritime Safety Administration</i> )
NECA	Área de Controlo de Emissões de Óxidos de Azoto ( <i>Emission Control Area for Nitrogen Oxides</i> )
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Azoto
OPEX	Despesas operacionais ( <i>Operational Expenditures</i> )
PAH	Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos ( <i>Polycyclic Aromatic Hydrocarbon</i> )
PEMFC	Células de Combustível de Membrana de Permuta de Protões ( <i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i> )
PM	Partículas ( <i>Particular Matter</i> )
RCLE-EU	Regime de Comércio de Licenças de Emissões da União Europeia
RTE	Rede Transeuropeia de Transporte
SCR	Redução Catalítica Seletiva ( <i>Selective Catalytic Reduction</i> )
SECA	Área de Controlo de Emissões de Enxofre ( <i>Sulphur Emission Control Area</i> )
SEEMP	Plano de Gestão de Eficiência Energética do Navio ( <i>Ship Energy Efficiency Management Plan</i> )



SFC	Consumo Específico de Combustível ( <i>Specific Fuel Oil Consumption</i> )
SI	Ignição por Centelha ( <i>Sparkle Ignition</i> )
SMR	Reformador de Metano a Vapor ( <i>Steam Methane Reformer</i> )
SOFC	Célula de Combustível de Óxido Sólido ( <i>Solid Oxide Fuel Cell</i> )
SOLAS	Convenção Internacional para a Salvaguarda da Vida Humana no Mar ( <i>Safety of Life at Sea Convention</i> )
SO <sub>x</sub>	Óxidos de Enxofre
TCO	Custo Total de Propriedade ( <i>Total Cost of Ownership</i> )
TEU	Unidade equivalente a vinte pés ( <i>Twenty-foot Equivalent Unit</i> )
VFD	Conversores de Frequência Variável ( <i>Variable Frequency Drivers</i> )
VLCC	Navio Transportador de Petróleo Bruto Muito Grande ( <i>Very large Crude Carrier</i> )
WTT	Processo de Produção desde o poço até a distribuição ( <i>Well to Tank</i> )
WTW	Processo de Produção desde o poço até a utilização ( <i>Well to Wake</i> )





## 1. INTRODUÇÃO

Desde meados da década de 1970, a poluição atmosférica causada por navios tem sido tema de discussão nos comités técnicos da Organização Marítima Internacional (IMO). Contudo, somente em 1991, foi adotada a Resolução A.719(17), abordando especificamente a problemática da poluição atmosférica proveniente de navios. Entretanto, foi somente após a ratificação do Protocolo de Quioto, em 1997, que a IMO decidiu introduzir o Anexo VI à Convenção MARPOL, o qual trata da poluição atmosférica causada por navios.

Assim que entrou em vigor, já existiam algumas disposições referentes à eficiência energética de navios nesse mencionado Anexo VI. Contudo, somente em julho de 2011 é que medidas de eficiência energética, como o *Energy Efficiency Design Index* (EEDI) para novos navios e o *Ship Energy Efficiency Management Plan* (SEEMP<sup>1</sup>) para todos os navios, tornaram-se obrigatórios, representando assim o primeiro conjunto de medidas obrigatórias de eficiência energética adotadas para o setor dos transportes, de uma forma geral.

Posteriormente, em 2016, foi adotada também de forma obrigatória, a implementação do *Data Collection System* (DCS<sup>2</sup>) para navios com tonelage bruta superior a 5000GT, a fim de recolher e declarar o consumo anual de combustível. Já em 2018, foi adotada a estratégia inicial da IMO para reduzir os gases de efeito de estufa no transporte marítimo. Essa estratégia tem sido revista continuamente, tornando-se gradualmente mais clara e, simultaneamente, mais rigorosa.

E por fim, mais recentemente entrou em vigor em 1 de janeiro de 2023 o cálculo do indicador de intensidade de carbono (CII), conforme já previsto na parte III do plano de eficiência energética dos navios, que mede a eficiência que um navio com tonelage superior a 5000GT de transporte de mercadorias ou de passageiros.

Como esse índice é recente e aplicado pela primeira vez aos navios, o primeiro relatório CII com base nos dados de 2023 foram entregues até 31 de março de 2024. Assim, os navios irão receber uma classificação de A (maior superior), B (menor superior), C (moderado), D (menor inferior) ou E (inferior). Os limites de classificação irão tornar-se cada vez mais rigorosos até 2030. Um navio classificado como D por três anos consecutivos ou classificada como E precisará de desenvolver um plano de ações corretivas para melhorar o seu desempenho.

---

<sup>1</sup> *Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)* – Plano de Gestão de Eficiência Energética de Navios é um documento obrigatório que define medidas para melhorar a eficiência energética operacional dos navios, reduzindo o consumo de consumo de combustível e as emissões de gases de efeito de estufa durante as operações marítimas.

<sup>2</sup> *IMO Data Collection System (DCS)* – Refere-se a um sistema da Organização Marítima Internacional que requer que os navios acima de 5000GT recolham dados anuais sobre o consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub> para monitorizar e reduzir a pegada de carbono do setor marítimo.



A década de 2020 representa um período determinante, ao final da qual teremos a certeza se estarmos ou não no caminho adequado para a descarbonização. Até ao momento, observamos consideráveis avanços não apenas na pesquisa sobre novos combustíveis considerados ecológicos e sustentáveis, mas também nas investigações relacionadas com o ciclo de vida do carbono e de outros poluentes. Essa abordagem visa assegurar que o setor do transporte marítimo não transfira suas emissões de poluentes para outros setores durante o processo de descarbonização.

A sociedade classificadora DNV GL estima que o transporte marítimo tenha emitido cerca de mil milhões de toneladas de dióxido de carbono até o ano de 2020. Deste total, por exemplo, um sexto (16%) ocorreu durante a extração, produção e distribuição do combustível.

O ano de 2023 ficou marcado por decisões importantes relativamente às regulamentações de gases de efeito de estufa emitidos pelo setor marítimo. A Organização Marítima Internacional (IMO) reviu a sua estratégia e reforçou os seus objetivos de redução das emissões de poluentes para o transporte marítimo internacional. As novas metas incluem uma redução de 20% nas emissões até 2030, uma redução de 70% até 2040 (em comparação com os níveis de 2008) e o objetivo final de alcançar emissões líquidas zero até 2050. Prevê-se que entrem em vigor novas regras em meados de 2027. A UE concordou em incluir o transporte marítimo no seu regime de comércio de licenças (RCLE-UE<sup>3</sup>) a partir de 2024 e em estabelecer requisitos em matéria de emissões de gases com efeito de estufa (*FuelEU Maritime*) a partir de 2025.

É crucial salientar que para alcançar esses objetivos tão otimistas, é fundamental destacar três princípios-chave. Estes princípios irão impulsionar a descarbonização dos navios, assentes em padrões que estabelecem critérios e metas de avaliação de sustentabilidade, métodos de cálculo de emissões de gases de efeito de estufa e requisitos de diagnóstico e relatório.

Os três princípios-chave anteriormente indicados são: regulamentações e políticas, expectativas dos armadores e consumidores e acesso a investimento e capital (DNV, 2023). Dessa forma, afirma Eirik Ovrum, consultor principal da DNV GL e autor principal da previsão marítima para 2050: *"O sector marítimo precisa de conhecimentos e provas de designs, combustíveis e tecnologias de combustíveis que sejam eficazes, disponíveis e acessíveis"*.

É muito relevante destacar que, em 2024, completam-se doze anos desde a implementação das primeiras medidas pela IMO rumo à descarbonização. Ter um plano bem estruturado e claro em relação às metas tem sido crucial para os notáveis avanços que observamos atualmente.

A transição energética no setor marítimo está acelerando, conforme demonstram os dados mais recentes do *Maritime Forecast* da DNV. Em meados de 2022, um terço da tonagem de navios encomendados aos estaleiros possuía capacidade para utilizar combustíveis como gás natural liquefeito (LNG), gás natural liquefeito do petróleo (LPG) ou metanol em motores

---

<sup>3</sup> O Regime de Comércio de Licenças de Emissão da União Europeia (RCLE-UE) é um sistema regulatório que limita as emissões de gases de efeito de estufa de grandes instalações industriais na EU, permitindo-lhes comprar e vender créditos de emissão para cumprir suas metas de redução.

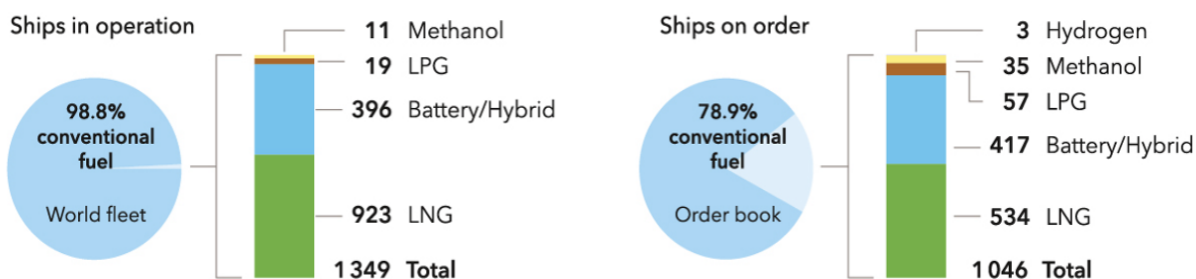


bicombustíveis. Esse número aumentou para metade em meados de 2023. Em termos de tonelagem, 6.5% dos navios em operação atualmente podem funcionar com combustíveis alternativos, em comparação com 5.5% no ano anterior.

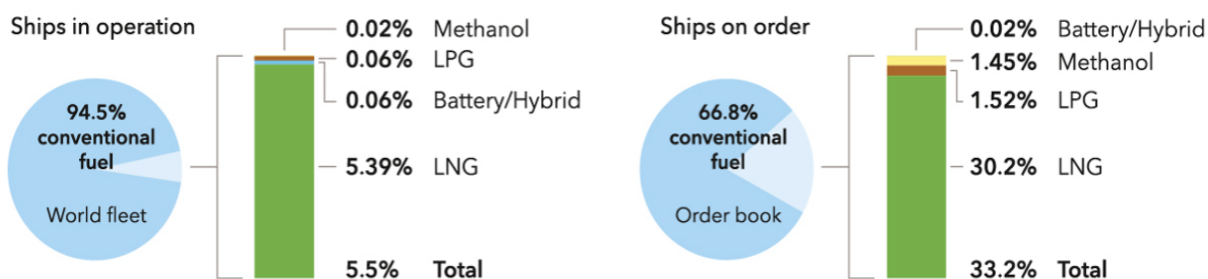
Contudo, é relevante notar que a absorção de metanol e LPG, bem como as primeiras novas construções de navios com propulsão a hidrogénio, já começaram a figurar nos dados, conforme é apresentado na figura 1. Embora navios alimentados a amoníaco estejam a ser também considerados, estes ainda não foram encomendados a estaleiros, embora apenas uma parcela reduzida desses navios (6.5%) opere efetivamente com combustíveis de baixo teor de carbono ou neutros em carbono, resultando num impacto real.

Apesar dos números serem ainda modestos, a perspetiva é de um crescimento exponencial a curto prazo. No entanto, é importante destacar que estamos ainda longe de poder competir com setores como aviação ou indústrias químicas, que utilizam, por exemplo, amoníaco como matéria-prima (Ovrum, E., 2023).

### NUMBER OF SHIPS



### IN % OF GROSS TONNAGE



**Figura 1.** Consumo de Combustíveis Alternativos na Frota Mundial por Números de Navios e Arqueação Bruta.

Fonte: DNV, 2022. *Energy Transition Outlook 2022: Maritime Forecast to 2050*.

A figura 1 apresenta dados detalhados sobre a significativa diferença no tipo de combustível utilizado por navios em operação em comparação com os navios encomendados. A grande quantidade de navios encomendados que não utilizam combustíveis fósseis evidencia o compromisso dos armadores com a sustentabilidade e a transição energética do setor.



**ESCOLA SUPERIOR NÁUTICA INFANTE D. HENRIQUE**



## **2. EVOLUÇÃO DAS REGULAMENTAÇÕES SOBRE POLUIÇÃO DE NAVIOS**

Para compreender as novas políticas e regulamentações em constante evolução, bem como conhecer as principais diretrizes da IMO, é igualmente crucial ficar a saber quais são as regiões estratégicas para o comércio marítimo e suas respectivas regulamentações regionais. É fundamental compreender a direção que estas políticas estão seguindo relativamente à descarbonização. Deste modo, apresentam-se seguidamente não apenas as últimas atualizações da IMO, mas também as iniciativas que a União Europeia, os Estados Unidos e a China têm vindo a adotar para alcançar o objetivo de neutralidade carbónica até 2050.

### **2.1. Organização Marítima Internacional**

Conforme mencionado anteriormente, em julho de 2023, a IMO concluiu a primeira revisão da sua estratégia inicial em matéria de redução de gases de efeito de estufa. Houve um reforço significativo nas metas para o transporte marítimo internacional, em comparação com a meta inicial de redução de 50% das emissões de gases de efeito de estufa até 2050. Além da estratégia previamente mencionada, existe uma outra meta para 2030 de introduzir tecnologias, combustíveis e/ou fontes de energia com emissões de gases de efeito de estufa nulas ou quase nulas, representando pelo menos 5% da energia utilizada pelo transporte marítimo internacional, com o esforço de atingir 10%.

Para assegurar que o transporte marítimo alcance essas metas, a IMO optou por implementar um conjunto de medidas composto por duas partes distintas.

Em primeiro lugar, um componente técnico que consistirá numa norma baseada em metas para os combustíveis marítimos, regulando a gradual redução da intensidade dos gases de efeito de estufa desses combustíveis. Em segundo lugar, um componente económico que será uma espécie de mecanismo marítimo de taxaço das emissões de gases de efeito de estufa, possivelmente vinculado ao indicador de intensidade de gases de efeito de estufa.

O desenvolvimento dessas medidas seguirá conforme o calendário acordado, e será formalmente adotado em 2025, entrando em vigor em meados de 2027.

Quanto à implementação do Indicador de Intensidade de Carbono (CII), do Plano de Eficiência Energética dos Navios (SEEMP) e do Índice de Eficiência Energética dos Navios Existentes (EEXI), estes estão já definidos. Com efeito, durante o último ano, apenas foram introduzidas pequenas atualizações nas orientações já aprovadas.

Reconhecendo o interesse significativo na utilização de biocombustíveis, a IMO também tenciona introduzir o conceito de combustíveis sustentáveis certificados, com pelo menos 65% menos emissões de gases de efeito de estufa desde a extração até à utilização, em comparação com os combustíveis fósseis, podem utilizar um fator de emissão de CO<sub>2</sub> reduzido no âmbito do sistema de recolha de dados (DCS) e do CII.



Embora tenham sido identificados diversos desafios relacionados com o CII, especialmente em navios com longos períodos de espera, permanência em portos e operações estacionárias, não estão previstas neste momento alterações ao quadro do CII. A nova revisão estará concluída até ao final de 2025.

## 2.2. União Europeia

A União Europeia estabeleceu metas legalmente vinculativas à Lei Europeia do Clima, para reduzir as emissões em 55% até 2030 relativamente a 1990, visando atingir a neutralidade climática até 2050. Essas metas estão integradas no *European Green Deal*, também conhecido como Pacto Ecológico Europeu, e operacionalizadas pelo pacote legislativo *Fit for 55* (IEA, 2021).

No âmbito do Pacto Ecológico Europeu, a UE vê nesse contexto uma oportunidade para desacoplar o crescimento económico do uso de recursos, pretendendo criar oportunidades para a indústria no âmbito das tecnologias e soluções sustentáveis. A seguinte iniciativa representa um plano para a transformação necessária para alcançar esses objetivos, e o pacote legislativo *Fit for 55*, proposto em 2021, e agora integralmente adotado, constitui uma parte fundamental desse plano (*European Commission*, N/A).

Essas iniciativas abrangem basicamente atos legislativos para todos os setores da indústria, no entanto, no âmbito dos transportes marítimos, dois desses atos, o RCLE-UE e o *FuelEU Maritime*, estabelecem requisitos específicos para os navios. O Regime de Comércio de Licenças de Emissão da UE (RCLE-UE) está incluído no sistema de comércio de emissões (ETS<sup>4</sup>), sigla em inglês e é um dos principais instrumentos do bloco europeu para reduzir as emissões de gases de efeito de estufa e que, a partir deste ano, 2024, passará a incluir o transporte marítimo (Parlamento Europeu & Conselho da União Europeia, 2023).

Este consiste num sistema de limitação e comércio de emissões, no qual uma quantidade limitada de licenças de emissão é disponibilizada no mercado e pode ser negociada. O limite máximo é reduzido anualmente, alinhando-se com a meta da UE para 2030 de redução de 55% das emissões em relação a 1990 e com o objetivo da neutralidade climática até 2050.

A partir do ano corrente, o sistema de comércio de emissões passa a abranger emissões de CO<sub>2</sub> de navios com arqueação bruta superior a 5000GT, que transportam carga ou passageiros para fins comerciais na UE.

Esses navios deverão adquirir e devolver licenças de emissão de gases de efeito de estufa, conforme comunicado pelo *EU Monitoring, Reporting and Verification* (EU-MRV<sup>5</sup>). A partir de 2025, e até 31 de março de cada ano, deve ser apresentado um relatório de emissões à autoridade administrativa na qual o navio é registado. Esse relatório deve agregar as emissões

---

<sup>4</sup> *Emission Trading System (ETS)* - Sistema de Comércio de Emissões

<sup>5</sup> *EU Monitoring, Reporting and Verification (EU-MRV)* – Refere-se ao sistema obrigatório de monitorização, comunicação e verificação estabelecido pela Comissão Europeia para navios com mais de 5000GT



## ESCOLA SUPERIOR NÁUTICA INFANTE D. HENRIQUE

comunicadas e verificadas no âmbito do RCLE-UE para cada navio sob responsabilidade da empresa durante o período de referência (ou seja, o ano civil).

Uma empresa que não cumprir as obrigações por dois ou mais períodos consecutivos pode ser impedida de permitir que todos os navios sob sua responsabilidade escalem portos da União Europeia. Essa seria a primeira vez que navios envolvidos no comércio internacional estariam sujeitos a um preço do carbono, e prevê-se que o RCLE-UE tenha um impacto financeiro significativo.

O âmbito de aplicação do EU-MRV e do RCLE serão progressivamente aumentados nos próximos anos. A partir do ano corrente, 2024, deverão ser comunicados os valores de metano e os óxidos de azoto, sendo incluídos no RCLE a partir de 2026. Os navios de apoio às plataformas *offshore* serão obrigados a apresentar relatórios a partir de 2027, e aqueles com mais de 5000GT serão incorporados no RCLE a partir do mesmo ano. A MRV também será aplicada a navios de carga geral e *offshore* com arqueação bruta entre 400 e 5000GT a partir de 2025, com uma avaliação em 2026 para possível inclusão no *Emission Trading System* (ETS) numa fase posterior. Outros navios de carga e passageiros entre 400 e 5000 GT serão avaliados para inclusão no MRV e no ETS também em 2026.

A UE também adotou o regulamento *FuelEU* como componente essencial do pacote *Fit for 55*, com o propósito de impulsionar a procura e utilização consistente de combustíveis renováveis e com baixo teor de carbono de forma a garantir simultaneamente o bom funcionamento do tráfego marítimo e evitar perturbações no mercado interno.

O regulamento apenas entra em vigor no dia 1 de janeiro de 2025 e serão estabelecidos requisitos cada vez mais rigorosos para as emissões médias anuais de gases de efeito de estufa desde a extração até o consumo por unidade de energia utilizada pelo navio (gCO<sub>2</sub>e/MJ). Segundo dados da sociedade classificadora Bureau Veritas, esses limites de emissões iniciam-se com uma redução de 2% em 2025, aumentando para 6% em 2030 e acelerando a partir de 2035, alcançando uma redução de 80% até 2050.

Para além das exigências anteriormente citadas, a regulamentação *FuelEU* também estabelece como obrigatório, a partir de 2030, que navios porta-contentores e navios de passageiros utilizem energia de terra ou que possuam outras fontes de energias que proporcionem benefícios ambientais equivalentes, quando fizerem em escalas com duração superior a duas horas num porto da rede transeuropeia de transporte (RTE-T). A partir de 2035, essa exigência será aplicada a todos os portos onde a energia de terra esteja disponível. A energia fornecida ao navio a partir do porto também é considerada no cálculo da intensidade anual de gases de efeito de estufa, sendo classificada como tendo zero emissões desde a extração até o consumo.

Outro aspeto relevante abordado no âmbito da RCLE-EU são as cláusulas relacionadas com a utilização da Captura e Armazenamento de Carbono (CCS), conforme estabelecido pela diretiva da CAC UE (2009/31/CE). Contudo ainda existe a necessidade de esclarecer sobre como isso irá funcionar especificamente para a captura de carbono no transporte marítimo. O



*FuelEU Maritime* inclui uma disposição para rever a captura de carbono a bordo, bem como outras novas tecnologias e combustíveis, até 1 de janeiro de 2027.

Em março de 2023, a UE propôs uma lei da indústria *Net Zero*, com o objetivo de desenvolver e fortalecer a capacidade industrial europeia, assegurando que a procura por tecnologias e soluções neutras seja efetuada em grande parte por meio da produção europeia. Até 2030, a UE pretende produzir 10 milhões de toneladas por ano de hidrogénio limpo, além de alcançar uma capacidade de armazenamento anual de 50Mt de dióxido de carbono. Já existem diversos incentivos políticos para apoiar a pesquisa e o desenvolvimento, incluindo no setor de transportes marítimos, como o programa Horizonte Europa e o Fundo de Inovação, financiado por receitas provenientes da venda em leilão de parte das licenças de emissão de gases de efeito de estufa (*European Commission, 2023*).

### 2.3. Estados Unidos

Os Estados Unidos não estabeleceram uma meta climática nas suas leis nacionais, mas ao regressar ao Acordo de Paris em 2021, o país assumiu o compromisso de atingir uma redução de 50% a 52% nas emissões líquidas de gases de efeito de estufa até 2030. O Departamento de Estado dos EUA e a Casa Branca divulgaram uma estratégia de longo prazo, comprometendo-se a alcançar emissões líquidas nulas até 2050. Essa estratégia foca, entre outros aspetos, em investimentos na produção de energia renovável, na diminuição de emissões de metano e no aumento das técnicas de remoção natural<sup>6</sup> e tecnológicas de carbono.

No final de 2023, o departamento de Gestão e Orçamento juntamente com os de Política Científica e Tecnológica e de Política Climática Interna da Casa Branca divulgaram a estratégia nacional para o avanço integrado dos sistemas de medição, monitorização e digitalização dos EUA. Essa estratégia tem por finalidade melhorar a coordenação e integração da informação de forma a fazer um melhor e mais eficiente uso dos recursos e aproveitar os mais recentes avanços tecnológicos para fornecer dados mais abrangentes para apoiar a ação climática.

Nesse relatório, apresentam-se as iniciativas da fase I da estratégia referentes às emissões presentes em vários setores. Com destaque para a indústria marítima, conforme indicado no documento, a Agência de Proteção Ambiental (EPA<sup>7</sup>), em colaboração com a NASA e o *U.S GHG<sup>8</sup> Center*, têm dedicado vários anos à identificação dos maiores emissores de poluentes, visando a criação de um inventário nacional de emissões. Para além disso, são implementadas outras medidas para obtenção e quantificação de dados de qualidade e fiáveis, essenciais para

---

<sup>6</sup> Além das tecnologias empregues para a captura do carbono, a estratégia ambiental dos Estados Unidos também sublinha métodos naturais de remoção de carbono da atmosfera. Isso inclui a ampliação da cobertura florestal, especialmente em áreas urbanas com alto potencial de absorção de dióxido de carbono, a adoção de práticas agrícolas climaticamente inteligentes, como o pastoreio rotativo, e melhorias no manejo de esterco e nutrientes agrícolas de para reduzir as emissões de metano.

<sup>7</sup> *US Environmental Protection Agency (EPA)* - A agência de proteção ambiental Americana é uma agência federal do governo dos EUA responsável por proteger a saúde humana e o meio ambiente, regulando e aplicando leis para combater os crimes voltados à natureza e aos seres vivos em geral.

<sup>8</sup> Greenhouse Gases (GHG) - Gases de Efeito de Estufa



apoiar ações climáticas a nível local, estadual e nacional, aspetos fundamentais para a fase II desta estratégia (*Greenhouse Gas Monitoring and Measurement Interagency Working Group*, Pág. 47).

A estratégia elaborada por várias agências federais dos Estados Unidos pode ser considerada como o início de uma “*task-force*” para atingir as metas de redução de emissões de gases de efeito de estufa e, essencialmente, descreve ações em matéria de investigação, inovação, recolha de dados, investimentos em infraestruturas, colaboração entre as partes interessadas, bem como a melhoria da conceção e do planeamento.

A curto prazo, é improvável que os EUA implementem requisitos adicionais relativamente à poluição atmosférica de navios em operação internacional e que escalem portos norte americanos ou que naveguem nas suas águas. Contudo, observam-se requisitos estaduais específicos, como na Califórnia, que, desde 2014, estabeleceu regulamentações para aumentar o uso de energia de terra durante a estadia ao cais, abrangendo navios de passageiros, porta-contentores e de carga frigorífica, com planos para estender estas medidas a petroleiros e navios Ro-Ro nos próximos anos.

Os Estados Unidos também lançaram diversas iniciativas significativas no setor do transporte marítimo, como a *First Movers Coalition* em 2021 e, em parceria com a Noruega, o *Green Shipping Challenge* em 2022. Como indicador de seu envolvimento, os EUA comprometeram-se a facilitar os corredores de transporte marítimo sustentável e a desenvolver um plano de ação nacional para reduzir as emissões de gases de efeito de estufa no setor de transporte marítimo, o qual, ao que tudo indica, já está em desenvolvimento.

Os EUA possuem diversas iniciativas políticas para apoiar a produção de energias renováveis, o desenvolvimento de veículos de tecnologia avançada, incluindo navios e a expansão das infraestruturas marítimas. A lei de redução da inflação (IRA), promulgada em 2022, representa um instrumento político crucial para sustentar a estratégia nacional de longo prazo, prevendo investimentos diretos na ordem de US\$ 369 bilhões. O principal objetivo dessa lei é garantir a segurança energética, reduzir as emissões de carbono e fomentar a inovação energética, entre outros objetivos. São concedidos créditos fiscais para a produção de hidrogénio limpo, assim como para a captura, utilização ou remoção do carbono.

A IRA também contempla um novo programa de descontos e subvenções, totalizando US\$ 3 bilhões para a Agência de Proteção Ambiental (EPA) destinado a financiar equipamentos ou tecnologias portuárias de emissões zero.

Através dessas inúmeras iniciativas, os EUA evidenciam para o resto do mundo que a pesquisa em tecnologias e energias sustentáveis é crucial para obter a descarbonização global. Sem tais iniciativas, torna-se inviável atingir metas tão ambiciosas.



## 2.4. China

Em setembro de 2020, o presidente da China Xi Jinping comprometeu-se a atingir o pico das emissões de carbono no país o mais rapidamente possível, e, no máximo, até 2030, para que consiga iniciar o mais rapidamente possível uma redução, com o objetivo de alcançar a neutralidade carbónica até 2060. Estas metas, conhecidas como "30-60", foram anunciadas como parte das chamadas *China's Intended Nationally Determined Contributions* (INDCs<sup>9</sup>) da China no âmbito do Acordo de Paris. As INDC's integram a estratégia chinesa de transição energética para um modelo económico mais sustentável. Esse compromisso é particularmente significativo, uma vez que a China é atualmente o maior emissor a nível mundial de dióxido de carbono, responsável por aproximadamente 28% das emissões globais (UN Climate Change, 2021).

Em outubro de 2021, o Conselho de Estado Chinês aprovou o Plano de Ação para o Pico de Dióxido de carbono até 2030. No que diz respeito ao setor do transporte marítimo, a China comprometeu-se a agir com maior rapidez na modernização de navios antigos, no desenvolvimento de navios movidos a energia elétrica e LNG, na promoção da oferta de energia de terra durante a permanência dos navios em porto, e em esforços mais aprofundados para impulsionar a construção e utilização de navios ambientalmente sustentáveis e inteligentes ao longo da costa e em vias navegáveis interiores, ajustando-se às condições locais.

Desde a conceção a nível estratégico, agências governamentais de vários níveis na China estão implementando medidas para concretizar o pico de carbono e o plano de ação para a neutralidade de carbono no setor do transporte marítimo durante o período do 14º plano quinquenal (2021-2025). Existem também diversas iniciativas de entidades como o Ministério dos Transportes em se dedicar ao desenvolvimento do transporte sustentável e a incentivar a adoção de fontes de energia novas e limpas, como o LNG, metanol, amoníaco, hidrogénio, entre outras, e também à promoção do aumento da utilização de energia de terra.

Além dos planos de ação, em dezembro de 2022, foi apresentado ao Comité Permanente do Congresso Nacional Popular um projeto de emenda à Lei de Proteção do Meio Marinho abrangendo todas as áreas marítimas sob jurisdição da China. Esse projeto tem como objetivo incorporar cláusulas visando a redução das emissões de gases de efeito de estufa no setor do transporte marítimo. A emenda propõe a promoção de fontes de energia novas e limpas nos navios, bem como a obrigação do uso de energia de terra. Além disso, sugere tornar obrigatório que os governos das regiões costeiras, ao nível distrital, forneçam apoio financeiro e implementem políticas preferenciais para incentivar a modernização das instalações de fornecimento de energia de terra, assim como a construção de navios movidos por energias limpas e novas.

---

<sup>9</sup> *China's Intended Nationally Determined Contributions* (INDCs) – Contribuições pretendidas determinadas nacionalmente pela China.



A política nacional da China para a descarbonização do transporte marítimo concentra-se principalmente no desenvolvimento sustentável e de baixo carbono do transporte marítimo de cabotagem. Para o transporte marítimo internacional, o governo incentiva a indústria naval chinesa a impulsionar a transformação verde por meio de exploração ativa, inovação e colaboração internacional. O regulamento sobre dados de consumo de energia e intensidade de carbono nos navios, em vigor desde dezembro de 2022, estipula que todos os navios com arqueação bruta superior a 400GT, independente da bandeira que hasteia, que entram ou saem dos portos chineses devem comunicar os dados de consumo de energia da sua última viagem à Administração de Segurança Marítima da China (MSA).

Quanto às medidas baseadas no mercado, o regulamento de consumo de licenças de emissões nacional chinês começou a operar em 2021, abrangendo atualmente apenas a produção de energia. Embora a expansão planeada no RCLE para sete novos setores não inclua o transporte marítimo, a experiência bem-sucedida dos mercados-piloto locais sugere que o mercado nacional pode ser aumentado. O mercado ETS de Xangai já inclui empresas de navegação e portos locais na sua lista de unidades de gestão de licenças de emissão de carbono desde 2021, indicando a possibilidade de expansão do ETS nacional para o setor.

É possível observar que a meta de redução das emissões de gases de efeito de estufa, como a meta "30-60", desempenham um papel central numa nova e recente política climática chinesa. Nessa abordagem, a redução das emissões de gases de efeito de estufa é considerada um objetivo independente, não sendo apenas um benefício secundário decorrente de prioridades imediatas, como a eficiência energética e a modernização industrial (Downie, E., 2021).



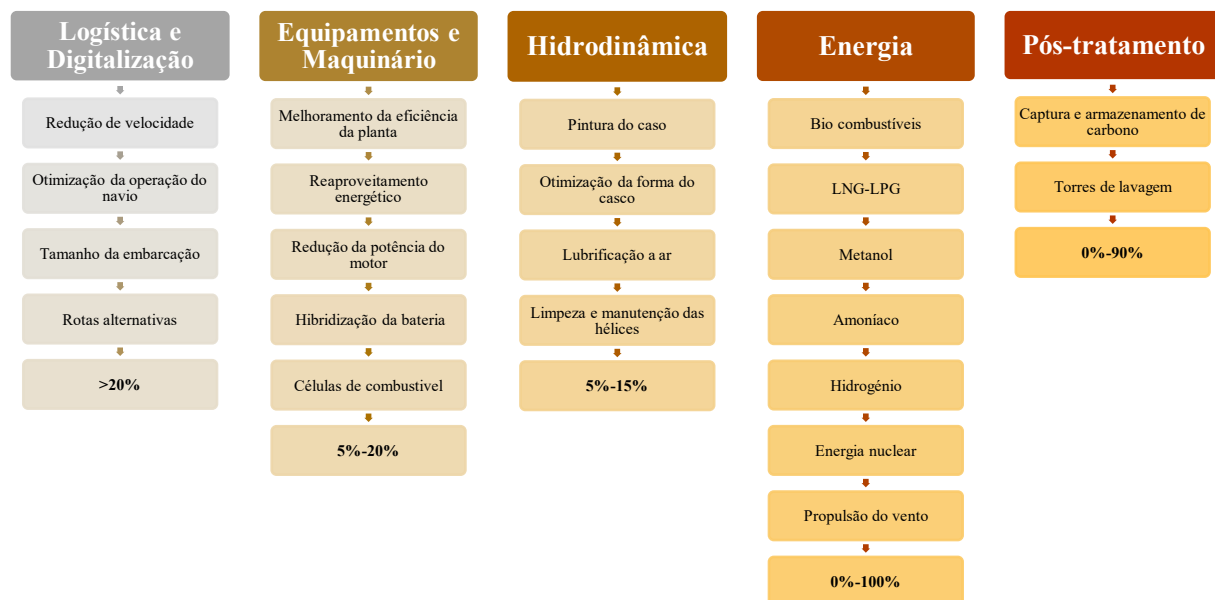
**ESCOLA SUPERIOR NÁUTICA INFANTE D. HENRIQUE**



### 3. OS CAMINHOS PARA A SUSTENTABILIDADE: A VIABILIDADE DOS COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

Para atingir a descarbonização efetiva no setor do transporte marítimo, vai ser imprescindível adotar diversas iniciativas. Conforme indicado no relatório divulgado pelo Secretariado-Geral do Fórum Internacional dos Transportes (ITF), é possível observar uma redução nas emissões de gases de efeito de estufa no transporte marítimo até 2035, decorrente da diminuição no uso de combustíveis fósseis e da crescente regionalização do comércio. No entanto, essa redução será apenas moderada. Para atingir a descarbonização plena do transporte marítimo até 2035, será necessário implementar melhorias operacionais e técnicas de grande magnitude (ITF, 2018 - pág. 25)

Este capítulo identifica as medidas viáveis para alcançar esse objetivo, classificando-as em três categorias: combustíveis alternativos, medidas tecnológicas e operacionais. Foi avaliada cada medida em relação ao potencial de redução de emissões, conforme apresentado na figura 2, bem como outros impactos e condições para sua implementação. É importante destacar que o potencial de redução de emissões apresentados em cada subseção é analisado individualmente, no entanto, as potenciais interações entre elas devem ser levadas em consideração para uma melhor aproximação da realidade. Ao final deste capítulo, é fornecido uma visão geral das reduções máximas de emissões que parecem ser viáveis para os próximos dez anos, caso essas medidas sejam combinadas. O capítulo conclui apresentando combinações de medidas que poderiam resultar em diferentes trajetórias de descarbonização para o transporte marítimo nos próximos dez anos.



**Figura 2.** Potencial de Redução de emissões de gases de efeito de estufa (GEE) de Tecnologias que Podem Contribuir para a Descarbonização do Transporte Marítimo.

Fonte: Adaptado de DNV, 2022. *Energy Transition Outlook 2022: Maritime Forecast to 2050*.



É relevante destacar que o processo de transição energética no uso de combustíveis já está em andamento. No que se refere aos navios em operação, cerca de 6.52% da tonelagem já possui capacidade para utilizar combustíveis alternativos. Muitos navios de grande porte já estão equipadas com sistemas de propulsão assistida pelo vento, enquanto sistemas de lubrificação a ar estão a ser instalados ou encomendados para centenas de navios (DNV GL, 2023).

Motivados por regulamentações mais rigorosas, o aumento nos custos operacionais associados aos combustíveis neutros em carbono irá impulsionar os esforços para uma operação mais eficiente de toda a frota mercante (IMO, 2020). Simultaneamente, essa dinâmica reforçará a motivação comercial para a implementação de medidas destinadas à eficiência energética (Bouman et al., 2017). As medidas de eficiência operacional dizem respeito à manutenção e operação dos navios, geralmente envolvendo custos de investimento baixos e custos operacionais moderados. Essas medidas incluem práticas como modelagem do casco e lastro otimizados, limpeza do casco e hélice, melhorar as técnicas de manutenção do motor, além de otimização da rota, programação e utilização do navio. Estas medidas não exigem investimentos significativos em *hardware* ou equipamento, embora a implementação muitas vezes exija programas que incorporem mudanças na gestão e treino dos operadores dos sistemas (IMO, 2020).

Por outro lado, as medidas de eficiência técnica procuram, em geral, reduzir a procura de energia do motor de propulsão e de energia auxiliar. Isto inclui melhorar a eficiência do casco e do hélice, reduzir a carga do sistema de hotelaria e a potência a fornecer de terra, bem como melhorar a utilização de energia por meio de práticas como recuperação do calor residual, sistemas híbridos de baterias e otimização do sistema de máquinas (Bouman et al., 2017; Lindstad et al., 2015). Estas medidas geralmente envolvem custos de investimento substanciais, mas apresentam efeitos potencialmente significativos na redução das emissões. Muitas dessas medidas técnicas são aplicáveis principalmente a navios novos, devido a dificuldades ou elevados custos de adaptação em navios já existentes (Faber et al., 2019). À medida que a complexidade do sistema aumenta e a necessidade de operação parcialmente automatizada dessas tecnologias intensifica-se, o *software* e o controlo tornam-se aspetos cada vez mais cruciais para a operação e o projeto de navios (IMO, 2020).

### 3.1. Metanol – Etanol

O metanol, sendo o álcool mais simples, é usado extensivamente na indústria química e a sua produção é viabilizada por diversas matérias-primas, incluindo as de origem fóssil e renovável (Methanol Institute, 2021). Atualmente, a maior parte do metanol é produzida a partir de fontes fósseis, como gás natural, carvão e petróleo. Em contraste, o metanol renovável, conhecido como e-metanol, é obtido a partir de fontes renováveis, como dióxido de carbono reciclado, biogás, biomassa, resíduos ou lodo de esgoto (IEA, 2021).

O etanol, outro álcool comum, é predominantemente produzido a partir de biomassa, especialmente milho e cana-de-açúcar, representando as principais matérias-primas globais (Bengtsson et al., 2012). O metanol e etanol, possuem aproximadamente metade da densidade



energética dos combustíveis fósseis. Essa característica introduz como principais desafios a exigência de espaço para armazenamento do combustível (Lindstad et al., 2015).

Ambos os álcoois podem ser corrosivos, exigindo uma cuidadosa seleção de materiais para os tanques e tubagens. Apesar do metanol ser classificado como tóxico, ao contrário do etanol que não apresenta riscos para o ser humano, o metanol tornou-se a escolha predominante na indústria desde os anos 1970 como alternativa economicamente viável aos combustíveis fósseis (Methanol Institute, 2021).

O metanol é considerado uma opção tecnicamente viável para reduzir as emissões no transporte marítimo, com estudos indicando melhorias ambientais significativas, independentemente da fonte ser gás natural ou renovável. Os resultados indicam menores emissões de óxidos de azoto (NOx) e uma pegada de carbono mais favorável em comparação com combustíveis convencionais (Bengtsson et al., 2012).

No entanto, o uso do metanol enfrenta desafios. Sua imiscibilidade com o Diesel exige modificações nos motores Diesel marítimos, envolvendo ajustes nos sistemas de injeção, nos tanques de combustível e nas tubagens (IEA, 2021). A segurança no armazenamento em navios também representa uma grande preocupação. Tanto o metanol como o etanol possuem pontos de inflamação abaixo dos requisitos estipulados pela Convenção Internacional para a Salvaguarda da Vida Humana no Mar (SOLAS) e pela IMO, tornando obrigatório o cumprimento das diretrizes estabelecidas no Código Internacional de Segurança para Navios que Utilizam Gases ou Combustíveis com Baixo Ponto de Inflamação (*IGF Code*). Essas medidas exigem avaliações de risco para assegurar a prevenção de incêndios e explosões, e toda a instalação deve ser construída conforme as diretrizes do código, obtendo aprovação prévia antes de entrarem em operação.

A primeira modificação de um navio para operar com metanol ocorreu em 2015, no Ferry M/V Stena Germanica, após a realização de projetos pilotos. Recentemente, a empresa Maersk anunciou a conversão de um navio porta-contentores, já em operação para bicomcombustível com metanol até 2024, procurando validar o potencial dessas conversões para estabelecer metas futuras de conversão em navios similares em 2027 (The Maritime Executive, 2023).

### *Viabilidade Financeira*

Conforme relatório do *FC Business Intelligence Ltd.* (FCBI Energy) encomendado pelo *Methanol Institute*<sup>10</sup>, a infraestrutura global atualmente destinada ao metanol baseia-se na sua distribuição pela indústria química, conferindo-lhe ampla disponibilidade. No entanto, é imperativo construir cadeias de abastecimento específicas para navios. A conversão de navios para o uso do metanol, incluindo a instalação de tanques de armazenamento, sistemas de

---

<sup>10</sup> *Methanol Institute (MI)* atua como associação comercial da indústria global de metanol, representando os principais produtores, distribuidores, transportadores e empresas de tecnologia do mundo.



combustível e modernização de motores, apresenta custos significativos de capital (CAPEX<sup>11</sup>) (Methanol Institute, 2021). Contudo, de acordo com as estimativas do FCBI energy, para um navio ferry de grande porte com um consumo anual de MGO de cerca de 10.000m<sup>3</sup>, é possível obter um retorno financeiro de três a cinco anos após a conversão para metanol, desde que o preço do metanol permaneça entre 100€ a 200€ abaixo por cada tonelada equivalente em comparação ao MGO. Essa projeção destaca a viabilidade económica do projeto a longo prazo.

Do ponto de vista económico, os custos de conversão, abrangendo sistemas de armazenamento e abastecimento, variam entre 5 e 15 milhões de dólares, não ultrapassando 25% do custo de construção de um novo navio. Em termos gerais, a modernização de um navio para bicomustível metanol/Diesel é estimada entre 250-350 euros por quilowatt (€/kW) (FCBI energy, 2015). A tabela 1, apresenta as estimativas de valores de CAPEX para cada item do projeto. Outro ponto relevante é a condição do metanol em estado líquido à temperatura ambiente, possibilitando a reutilização de tanques de lastro para o metanol durante uma eventual adaptação do navio, algo inviável no caso do combustível ser LNG, por exemplo. Esse aspeto é crucial ao considerar a capacidade de carga que um navio pode perder durante esta modificação.

Item	Valor [\$]
Tanques de Armazenamento	53\$ por kW
Manobra e Tubagens	60-106\$ por kW
Motor novo	120\$ por kW
Motor recondicionado	267-590\$ por kW

**Tabela 1.** Estimativa de CAPEX de Modernização de um Navio que consome Metanol (MeOH).

Fonte: *Sustainable Ships, 2023. The state of methanol as marine fuel 2023.*

Além disso, é possível deduzir que, dado o amadurecimento da tecnologia, é realista supor que o custo de navios novos operando com metanol pode ser equiparado ao custo de navios tradicionais movidos a combustível fóssil. Por exemplo, na instalação de óleo combustível pesado (HFO), são necessárias depuradoras e aquecedores de óleo combustível, equipamentos dispensáveis no uso do metanol, uma vez que este, em estado líquido à temperatura ambiente, pode ser trasfegado sem qualquer dificuldade.

A seguir, apresentam-se alguns exemplos de investimento CAPEX em navios que fizeram a conversão para Metanol ou para novas construções: (*Sustainable Ships, 2023*)

<sup>11</sup> *Capital Expenditure (CAPEX)* - Refere-se aos gastos de capital destinados à aquisição, melhoria ou manutenção de ativos físicos de longo prazo. É a soma de custos que leva um investimento em bens que proporcionarão benefícios futuros.



- M/V Stena Germanica – 24MW – 13M€ (custos específicos da conversão) – 22M€ preço total do projeto (incluídos tanques de armazenamento em terra e adaptação para operações de *bunker*) - 542€/kW
- Exemplo de nova construção – 2.7M€ - 273€/kW
- Caso de estudo da IMO – 24MW – 5.6M\$ nova construção/ 10.5M\$ “retrofit”

Quanto ao custo do navio M/V Stena Germânica, foi necessário efetuar um esforço adicional significativo devido a dificuldades que surgiram por se tratar do primeiro projeto de adaptação ao metanol. Portanto, estima-se que os custos atualmente sejam 30 a 40% inferiores para projetos subsequentes. Relativamente ao custo operacional (OPEX<sup>12</sup>), é fundamental considerar o preço do combustível, pois este constitui o componente mais significativo dos custos operacionais. O custo do metanol variou entre 180€ a 580€ nos dez anos considerados no relatório do FCBI, conforme ilustrado na figura 3.



**Figura 3.** Variação do Preço do Metanol nos Últimos 20 anos, em Comparação com outros Combustível Marítimos

Fonte: Marine Methanol, 2023.

A respeito da estimativa de custos elaborada pela IMO em 2016, com o objetivo de apresentar perspectivas de diversas fontes, os custos considerados no estudo são detalhados na tabela 2, tanto para uma adaptação de navio quanto para uma nova construção. Esses custos referem-se a um navio Ro-Ro com 24000 kW de potência e capacidade de navegação contínua por três

<sup>12</sup> *Operational Expenditures (OPEX)* refere-se aos gastos contínuos necessários para manter operações diárias de uma empresa, projeto ou navio, como custos de pessoal, manutenção, combustível e operação de equipamentos.



dias. As despesas com equipamentos e máquinas incluem todos os componentes e sistemas de segurança necessários para integrar o sistema de combustível a metanol.

<b>Custos Adicionais Aproximados para um Sistema Completo de Abastecimento de Metanol</b>	
<b>Nova Construção</b>	
<b>Item</b>	<b>Custo [mUSD]</b>
Motor e equipamentos relacionados	5.5
Armazenamento do Metanol	0.1
<b>Custo Total de uma Nova Construção</b>	<b>5.6</b>
<b>Conversão</b>	
<b>Item</b>	<b>Custo [mUSD]</b>
Conversão do Motor	3.5
Outros Equipamentos	3.5
Estaleiro	3.5
<b>Custo Total de uma Adaptação ao Metanol</b>	<b>10.5</b>

**Tabela 2.** Estimativa de CAPEX para um navio novo e para adaptação para consumo de MeOH

Fonte: Dados Adaptados da Organização Marítima Internacional, 2016.

Convém salientar que os custos da instalação contemplam diversos aspetos, como o porte do navio, o tipo de operação e a potência propulsora, entre outros. Dessa forma, os valores apresentados neste trabalho, e que serão abordados nas próximas seções, são montantes específicos calculados para cada navio, visando dar uma visão geral que permita a comparação sobre a implementação desta tecnologia.

### *Emissões*

Em relação as emissões, o metanol mostra reduções substanciais de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) em comparação com combustíveis convencionais, embora não atinja os níveis do Tier III para NO<sub>x</sub>. O uso de metanol também impõe desafios operacionais, como o desgaste do motor, consequência do facto de que combustíveis com enxofre reduzidos, possuem deficiências de lubrificação e também a necessidade de usar intensificadores de ignição. Em conclusão, enquanto o metanol surge como uma opção promissora para a redução de emissões no transporte marítimo, os armadores devem considerar cuidadosamente os custos associados, desafios operacionais e impactos ambientais para tomar decisões informadas sobre o “retrofit” dos motores dos navios.

Os fatores de emissão de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> para o metanol variam significativamente, entre 15% a 80% de redução para o caso do CO<sub>2</sub>. As emissões de SO<sub>x</sub> e CH<sub>4</sub> são reduzidas em 100%.

Tal como acontece com os combustíveis fósseis convencionais, as emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da combustão do metanol baseiam-se no teor de carbono por combustível por



unidade de energia produzida, o que pode variar ligeiramente de acordo com a pureza do combustível.

### *Outras Considerações*

Uma das características mais significativas do metanol relativamente aos outros combustíveis alternativos reside no facto de, sob pressão e temperatura ambientes, ele estar no estado líquido. Essa propriedade confere ao metanol facilidade de transporte, armazenamento e abastecimento, seguindo os procedimentos de segurança padronizados, semelhantes aos já utilizados para o Diesel. Consequentemente, os custos associados à conversão de navios equipados com motores bicomcombustíveis, bem como a infraestrutura terrestre para o armazenamento e fornecimento do metanol, são consideravelmente inferiores aos de outros combustíveis alternativos, os quais exigem pressurização ou criogenia, como é o caso do LNG (SEA-LNG, 2019).

Para além disso, o metanol possui uma maior densidade energética volumétrica em comparação com combustíveis alternativos como sejam o amoníaco ou hidrogénio, tornando-se uma escolha mais vantajosa para uma ampla variedade de tipos de navios e viagens de maior duração, devido à necessidade de abastecimento ser menos frequente (Methanol Institute, 2023).

As vantagens do metanol posicionam-no como uma das principais opções de combustível alternativo tanto no presente como no futuro, com o e-metanol, oferecendo à indústria marítima uma opção clara para a descarbonização. No curto prazo, o metanol convencional contribui para a redução das emissões de gases de efeito de estufa provenientes da combustão, enquanto, a longo prazo, o metanol verde possibilita que a indústria alcance as metas de descarbonização estabelecidas pela Organização Marítima Internacional. Dado que o metanol verde é quimicamente idêntico ao metanol convencional, não surgem problemas de compatibilidade ou necessidade de investimentos adicionais nos motores por parte das empresas de navegação, permitindo uma transição contínua e gradual até a descarbonização (Methanex, 2023).

### **3.2. Amoníaco**

Dentro do amplo espectro de tecnologias e soluções de combustíveis sustentáveis, o amoníaco anidro ( $\text{NH}_3$ ) emerge como uma perspetiva promissora para operadores e interessados no assunto, de forma geral, apresentando-se como um potencial combustível de longo prazo capaz de ingressar no mercado de maneira expedita. Esta substância tem a capacidade de proporcionar uma solução de emissões zero ou quase zero, tanto numa perspetiva “*tank-to-wake*” quanto, em determinadas circunstâncias, “*well-to-wake*”, independentemente da origem do combustível.

O amoníaco tipo anidro, composto por azoto e hidrogénio, é um produto químico amplamente disseminado e comercialmente acessível. Apesar da sua ocorrência comum, importa destacar que o amoníaco, em sua forma concentrada, apresenta características corrosivas e tóxicas. É geralmente disponibilizado no mercado na sua forma aquosa, geralmente contendo 28% de



amoníaco dissolvido em água, ou como amoníaco anidro, sendo que a sua produção global atual atinge aproximadamente 235 milhões de toneladas (Mt). Estima-se que o consumo anual de combustíveis residuais e destilados convencionais pelo transporte marítimo internacional, seja de 285Mt por ano, equivalente a cerca de 650Mt de amoníaco em termos energéticos, pelo que a produção do amoníaco deverá ser substancialmente aumentada para poder ser considerada como uma fonte de combustível fiável para a indústria marítima (EMSA<sup>13</sup>, 2023).

Apesar da limitada experiência marítima recente no emprego de amoníaco como combustível e do atual desenvolvimento de tecnologias-chave, como motores específicos, a sólida experiência terrestre na produção e utilização do amoníaco nas indústrias petroquímica e de fertilizantes constitui uma base robusta para a expansão de seu uso como combustível marítimo, ainda que a sua aplicação esteja em fase de pesquisa e desenvolvimento. Uma vantagem substancial do amoníaco é a sua conformidade com as normas de armazenamento estabelecidas pelo Código Internacional de Construção e Equipamentos de navios que Transportam Gases Liquefeitos a Granel (Código IGC), permitindo o seu transporte por navios transportadores de gás liquefeito (LPG).

O amoníaco, geralmente derivado do gás natural, já é produzido em larga escala e possui uma infraestrutura substancial, sendo a China a líder na sua produção, seguida por Rússia, Índia e Estados Unidos. A produção sustentável de amoníaco, contudo, pode ser aumentada por fontes renováveis, como energia solar, eólica e hidroelétrica, especialmente em regiões abundantes nesses recursos, como são a Austrália, Norte da África, Norte do Chile, Sul do Peru, Patagónia, África do Sul e diversas regiões da China (IRENA, 2022).

No contexto da distribuição, é fundamental considerar a proximidade de portos ou a existência de uma rede de tubagens de distribuição, a fim de assegurar uma distribuição eficiente e económica, além de minimizar o risco de interrupções na produção devido a questões de segurança.

Dada a semelhança entre a produção do amoníaco e do hidrogénio, surge a indagação pertinente sobre a viabilidade do uso direto do hidrogénio como combustível marítimo em detrimento do próprio amoníaco. A superioridade do amoníaco sobre o hidrogénio reside na forma líquida deste composto, que proporciona uma maior capacidade de armazenamento por metro cúbico em comparação com o hidrogénio líquido. Assim, elimina-se a necessidade de armazenamento criogénico e, para além da densidade energética do amoníaco ser semelhante à do hidrogénio líquido, resulta numa economia de custos de capital, especialmente relacionadas com as exigências de temperatura e pressão (DNV, 2024).

Acresce que, quando à temperatura e pressão atmosférica, o amoníaco apresenta-se no estado gasoso, caracterizado por ser incolor e dotado de um odor pungente. Sob condições de pressão

---

<sup>13</sup> *European Maritime Safety Agency (EMSA)* - A Agência Europeia de Segurança Marítima é uma entidade da União Europeia que promove a segurança marítima, a proteção ambiental e a eficiência do transporte marítimo, fornecendo assistência técnica e apoio operacional aos Estados-Membros.



elevada, ele liquefaz-se, facilitando o seu transporte e armazenamento a uma temperatura de  $-33^{\circ}\text{C}$ , significativamente mais controlável em comparação com o hidrogénio, que requer  $252^{\circ}\text{C}$  negativos. Estudos da sociedade classificadora DNV GL sobre a previsão marítima para 2050 destacam a versatilidade do amoníaco para a propulsão, abrangendo motores Diesel, células de combustível e turbinas de gás (DNV, 2024). Ademais, o armazenamento do hidrogénio líquido em tanques esféricos isolados, para minimizar a troca de calor, implica numa necessidade adicional de volume e uma considerável quantidade de energia para manter o hidrogénio em condições criogénicas durante o transporte marítimo ou armazenamento em terminais.

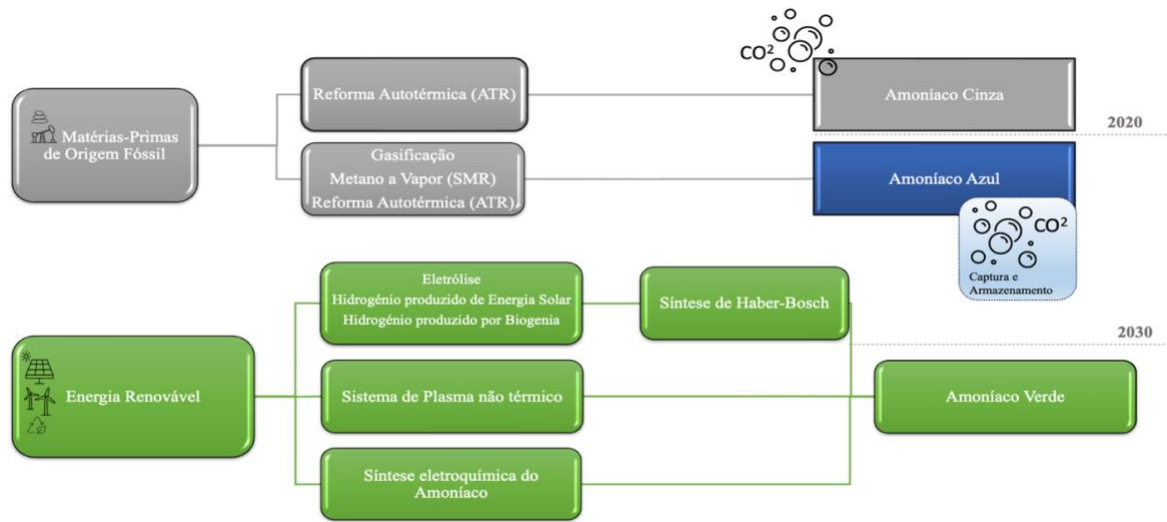
A segurança no abastecimento e armazenamento do amoníaco emerge como um fator crucial e assume uma posição de grande preocupação, distinguindo-se do hidrogénio e do metanol. Reconhecido como o mais perigoso desses combustíveis, o amoníaco exige treino adicional nos portos devido aos seus elevados riscos de toxicidade, sendo catalogado como uma substância perigosa sujeita a níveis e períodos de exposição regulamentados por padrões internacionais. A ausência de regras prescritivas específicas para o manuseamento do amoníaco dificulta a sua utilização a bordo, mesmo com a possibilidade de transporte por navios de gás (LPG). Esse cenário apresenta desafios significativos, incluindo elevado investimento de capital, disponibilidade limitada, infraestrutura global insuficiente e a necessidade de treino especializado da tripulação. A toxicidade do amoníaco, no contexto da sua aplicação como combustível marítimo, constitui o principal risco a ser mitigado (EMSA, 2023).

Adicionalmente, o amoníaco manifesta incompatibilidade com diversos materiais industriais; na presença de humidade, reage e corrói metais como cobre, latão, zinco e outras ligas, resultando na formação de uma cor esverdeada/azulada. Sendo um agente redutor alcalino, o amoníaco também reage com ácidos, halogénios e agentes oxidantes, introduzindo desafios associados à seleção de materiais para equipamentos e tanques a bordo.

A produção convencional de hidrogénio para a fabricação de amoníaco ocorre predominantemente por meio de metano a vapor (SMR) ou da reforma autotérmica (ATR) do gás natural (denominado amoníaco cinzento). Se as emissões de  $\text{CO}_2$  provenientes do processo de conversão do gás natural forem capturados e armazenados, o amoníaco é então classificado como ‘azul’. No entanto, há riscos significativos de fugas de metano, um gás de efeito de estufa com um potencial de aquecimento global cerca de 84-86 vezes maior que o do  $\text{CO}_2$  num horizonte de 20 anos tanto na unidade de produção quanto em qualquer outro ponto da cadeia de distribuição (IPCC, 2021). Para além disso, a taxa de captura de  $\text{CO}_2$  nos processos SMR e ATR é inferior a 95% (IEA, 2021). Ademais, a produção do amoníaco azul mantém a dependência de combustíveis fósseis. Dessa forma, o amoníaco ‘verde’, obtido a partir de hidrogénio derivado de fontes de energia renováveis (hidrogénio verde), é geralmente considerada a solução definitiva para a produção do amoníaco para o processo de descarbonização, enquanto o amoníaco azul é visto como uma solução intermédia (IRENA, 2022; IEA, 2021).



A figura 4 apresenta as principais rotas de produção do amoníaco, destacando as condições sob as quais o composto pode ser classificado como combustível verde, azul ou cinzento.



**Figura 4.** Rotas de Produção do Amoníaco Cinzento, Azul e Verde.

Fonte: Adaptado de EMSA, 2023.

Para possibilitar a produção em larga escala de amoníaco verde destinado ao transporte marítimo, é imperativo que a capacidade de produção, juntamente com a de eletricidade renovável e hidrogénio verde, tenham um crescimento substancial; a capacidade global instalada atual de parque eólicos, como de eletrolisadores necessários para a produção do hidrogénio verde essencial à fabricação de amoníaco, encontra-se aquém da procura exigida.

Os projetos anunciados de amoníaco verde, totalizando uma capacidade de 133Mt por ano, evidenciam o atual dinamismo na implementação dessa tecnologia (EMSA, 2022). Essa tendência reflete o reconhecimento generalizado do potencial do amoníaco verde como um veículo eficaz para transportar energia renovável por longas distâncias.

Embora os custos de produção do amoníaco verde permaneçam superiores aos do amoníaco derivados do gás natural nos Estados Unidos, existe a perspectiva de tornarem-se competitivos em regiões com tarifas reduzidas de eletricidades renovável. Contudo, é necessário destacar que a concretização desse potencial requer investimentos substanciais no desenvolvimento de fontes de energia, visando garantir a viabilidade dos combustíveis sintéticos, tais como hidrogénio e amoníaco (IEA, 2021; IRENA, 2022).

No âmbito da combustão em motores, o amoníaco apresenta desafios específicos, uma vez que é intrinsecamente difícil de inflamar. Exige uma energia de ignição elevada, geralmente proveniente de um combustível piloto ou outra fonte de ignição, para iniciar a combustão do amoníaco (Kobayashi et al., 2019). Adicionalmente, a sua alta temperatura de ignição automática e baixo índice de cetano tornam desafiador o desenvolvimento de sistemas de combustão marítima sem o auxílio de um combustível piloto. Podem ser empregues diversas



opções de combustíveis piloto, com destaque para o diesel marítimo (MDO/MGO) e éter dimetílico (DME). Para além destes, diversos bicompostíveis e óleos de baixo teor de enxofre (VLSFO) também se configuram como alternativas viáveis.

Contudo, diversos métodos de produção de amoníaco evidenciam diferentes eficiências desse gás como combustível, conforme ilustrado na tabela 3.

Tipo de Processo de Produção	Eficiência Esperada
Metodologia 1 Eletrólise e Síntese de Haber-Bosch	~72%
Metodologia 2 Hidrogénio produzido por Energia Solar	9% [até 70%]
Metodologia 3 Hidrogénio produzido por Biogenia	~57%
Metodologia 4 Sistema de Plasma não térmico	12-37% [até 45%]
Metodologia 5 Síntese eletroquímica do Amoníaco	14 a 62% [até 90%]

**Tabela 3.** Comparação da Eficiência Esperada para Cada Meio de Produção do Amoníaco.

Fonte: EMSA, 2022. *Potential of Ammonia as Fuel in Shipping*.

### *Viabilidade Financeira*

Assim como é necessário comprovar em escala real a eficiência de navios e combustíveis de emissão zero, o mesmo princípio se aplica aos modelos de financiamento e negócios que introduzirão essas inovações no mercado. Iniciativas como o *NoGAPS* e o *Green Shipping program* desempenham um papel crucial para ganhar confiança, tanto nas tecnologias quanto na infraestrutura, contribuindo para estabelecer a viabilidade económica de longo prazo do transporte marítimo movido a amoníaco.

No âmbito do *Green Shipping Program* da Noruega, a Grieg Star e os seus parceiros de consórcios marítimos fizeram uma avaliação abrangente para analisar a viabilidade de adaptação de um navio da Classe L da Grieg Star para operar com amoníaco. Especificamente, o foco recaiu sobre um navio graneleiro de convés aberto de 9 MW de potência propulsora, atualmente operando com VLSFO e MGO, com o objetivo de adaptá-lo para utilizar o amoníaco no motor principal. No início do processo, decidiu-se excluir a opção de energia auxiliar, uma vez que o projeto se concentrava principalmente no motor principal, responsável por cerca de 85% do consumo anual de óleo combustível da empresa.

As rotas principais planeadas para esse navio abrangeram o Golfo do México, Brasil e a região de Amsterdão-Roterdão-Antuérpia, na Europa. O estudo abordou cinco áreas distintas:



disponibilidade do amoníaco, questões e regulamentações de segurança, potenciais soluções de “retrofit”, aspetos financeiros e impacto operacional.

Os resultados referentes ao custo de capital (CAPEX) e operacional (OPEX), obtidos durante o estudo, estão ilustrados nas tabelas 4 e 5, respetivamente.

Item	Valor
Motor Principal	10
Sistema de Abastecimento de Combustível	6
Tanques de Armazenamento	4
Estaleiro	2
<b>Total</b>	<b>22</b>

**Tabela 4.** CAPEX Aproximado para Adaptação do Navio da Grieg Star ao consumo do Amoníaco

Fonte: *Green Shipping Programme, 2023. Ammonia Powered Bulk Carrier Pilot Report.*

Embora a viabilidade técnica do projeto fosse conhecida anteriormente, os projetistas perceberam que a sua complexidade era maior do que inicialmente previsto. Outro aspeto surpreendente foi o elevado custo associado.

A projeção dos custos previstos para a adaptação do navio, conforme indicado na tabela 4, é de US\$ 22 milhões para o tipo de adaptação estudado no projeto. Esse montante representa cerca de metade do custo do navio, estimado em aproximadamente US\$ 35 milhões, o que sugere um custo significativo para a adaptação.

No que se refere aos custos operacionais (OPEX), prevê-se um aumento de custos com a transição para o amoníaco, mas a estimativa é desafiadora devido à escassez de experiência operacional nesse contexto.

O incremento projetado nas despesas operacionais foi considerado no valor de US\$200.000 por ano (aproximadamente USD 550/dia), abrangendo principalmente a manutenção dos novos sistemas, a necessidade de engenheiros de serviços especializados e os custos de docagem para a adaptação do motor principal.

Entretanto, devido à grande incerteza, tanto relativamente às tecnologias quanto à disponibilidade futura desse combustível, espera-se que a faixa de custos possa ser refinada à medida que os armadores e operadores se familiarizem e adquiram mais experiência na operação de sistemas de combustíveis marítimos de amoníaco.

Num estudo que analisa o potencial do amoníaco como combustível marítimo com uma abordagem baseada na modelação de sistemas e análise de tomada de decisão, as características dos combustíveis marítimos são mapeadas através de revisão da literatura, e as opções de combustível marítimo são comparadas e pontuadas com base no seu desempenho relativo estimado, conforme ilustrado na tabela 5.



Item	Células de Combustível		Motores de Combustão Interna	
	Amoníaco Cinzento	Amoníaco Verde	Amoníaco Cinzento	Amoníaco Verde
CAPEX Sistema de Propulsão [USD/kW]	5300 - 11400*	5300-11400*	5200-7710*	5200-7710*
OPEX [USD/MWh]	11	11	9	9
Estimativa de Custo de Combustível em 2030 [USD/Gj]	27	35	27	35

**Tabela 5.** Desempenho do Amoníaco Produzido a Partir de Gás Natural, Eletrólise com Energia Renovável ou para uso em Células de Combustível

Notas: \*A tecnologia SCR é considerada aplicada às alternativas de motores de combustão interna (ICE) (a 133 USD/kW), preço assumido do motor ICE de 600 USD/kW e preço SOFC 925–1315 USD/kW.

Fonte: Hansson, J., Brynolf, S., Fridell, E. & Lehtveer, M., 2020. *The Potential Role of Ammonia as Marine Fuel—Based on Energy Systems Modeling and Multi-Criteria Decision Analysis*.

Os custos relacionados com o pós-tratamento de NO<sub>x</sub> também são contemplados nesse estudo. Uma técnica geralmente empregue é o sistema de redução catalítica seletiva (SCR<sup>14</sup>) para tratar os gases de evacuação após a queima de combustíveis no motor, de modo a manter as emissões de NO<sub>x</sub> com os limites regulatórios do Tier III. Considera-se o custo do SCR como 133USD por kW para todos os tipos e dimensões dos navios, sem alteração nos custos ao longo dos períodos considerados. Nessa análise, o preço estimado do motor de combustão interna é de 600 USD/kW, enquanto o preço do consumo específico de combustível (SFC<sup>15</sup>) situa-se entre 925 e 1315 USD/kW.

De acordo com Hansson, J., em 2020, no período de 2016 a meados de 2019, o preço global do amoníaco variou entre 10 e 20 USD/Gj (considerando um valor de aquecimento menor de 18,8 MJ/tonelada para amoníaco. O custo adicional do sistema de propulsão para um navio alimentado por amoníaco, equipado com um motor de combustão interna, foi estimado em aproximadamente 2 a 60%, em comparação com um navio convencional alimentado a óleo pesado. No caso das células de combustível, a variação foi de 8 a 300%, devido a grandes incertezas nos requisitos (Lloyd's Register, 2017 – UMAS).

<sup>14</sup> *Selective Catalytic Reduction (SCR)* – A Redução Catalítica Seletiva é uma tecnologia que utiliza um catalisador para converter óxidos de azoto em azoto (N<sub>2</sub>) e água (H<sub>2</sub>O) através da reação com amoníaco, reduzindo as emissões de poluentes resultantes da combustão em motores a Diesel.

<sup>15</sup> *Specific Fuel Oil Consumption (SFC)* – O Consumo Específico de Combustível é uma medida que expressa a quantidade de combustível consumida por uma unidade de energia gerada. É usado para avaliar a eficiência energética e comparar o desempenho entre diferentes sistemas ou equipamentos.



Tanto na ilustração quanto nos dados mencionados acima, percebe-se uma considerável incerteza em relação à viabilidade da utilização do amoníaco como combustível marítimo.

Um relatório mais recente encomendado pela Agência Europeia de Segurança Marítima (EMSA) apresenta valores atualizados de CAPEX em relação aos custos fixos suportados por navios recém-construídos. Isso inclui o custo do motor, pós-tratamento, armazenamento (tanques) e sistema de abastecimento de combustível. O relatório também realiza uma avaliação de segurança para navios de carga e passageiros envolvidos no comércio marítimo de curta ou longa distância, considerando a utilização do amoníaco verde e azul. A comparação do custo de motores de diferentes potências a VLSFO com motores a amoníaco, analisadas no relatório da EMSA são apresentadas na tabela 6.

Além disso, este estudo destaca o chamado custo total de propriedade (TCO) para os anos de 2030 e 2050. O TCO é a soma das anuidades de despesas de capital (CAPEX), custo de combustível e despesas operacionais anuais (OPEX), calculadas para os tipos de navios e categorias de tamanho definidas no quarto estudo dos gases de efeito de estufa da IMO 2020.



Custo do Motor de Navios x Potência Instalada				
Categoria de navio	Tipo de Combustível	Capacidade do Navio	Potência Instalada [kW]	Custo do Motor [USD]
Navios Pequenos	VLSFO	Todos os navios* com capacidade < 15000dwt	2400	185 USD
Navios Grandes	VLSFO	Todos os navios* com capacidade > 15000dwt	11000	230 USD
Porta-Contentores	VLSFO	Todas as capacidades de navios porta-contentores	-	215 USD
Navios Costeiros	Amoníaco	Todos os navios com capacidade < 2500dwt	2400	740 USD
Navios de Mar Aberto	Amoníaco	Todos os navios com capacidade > 2500dwt	11000	515 USD

Custos Adicionais				
Categoria de navio	Capacidade do Navio	Capacidade do Tanque de Armazenamento (GJ)	Potência Instalada [kW]	Custo por GJ [USD]
Navios Costeiros	Todos os navios com capacidade < 2500dwt	3500	2400	55 USD
Navios de Mar Aberto	Todos os navios com capacidade > 2500dwt	71300	11000	30 USD
Porta-Contentores	Todas as capacidades de navios porta-contentores	74600	23000	30 USD

**Tabela 6.** CAPEX do Motor e Tanques de Armazenamento de Acordo com o Tipo de Navio e Potência Instalada

Notas: \* Excluem-se os navios porta-contentores

Fonte: EMSA, 2022. *Potential of Ammonia as Fuel in Shipping*.

Conforme evidenciado na tabela anterior, o custo do sistema do motor está diretamente relacionado com a potência instalada do navio. Quanto aos custos adicionais associados a um



motor movido a amoníaco, como o sistema de injeção e os sistemas de segurança necessários, esses custos também evidenciam a proporcionalidade com a potência instalada dos navios.

Para efeitos de comparação, os custos com o motor podem variar de 200 a 440 USD/ para motores de combustão interna de combustível convencional em navios VLSFO, de 680 a 930 USD/kW para motores que utilizam o amoníaco (Horvath, 2017 e Hansson, Brynolf, Fridell e Lehtveer, 2020).

Supõe-se que a tecnologia SCR também será aplicada para alternativas com motores de combustão interna, com um custo de 133 USD/kW, visando cumprir à regulamentação Tier III, similarmente ao estudo prévio. Com base em propostas orçamentarias de estaleiros asiáticos, o custo do SCR para um navio de amoníaco, assumindo valores de NOx semelhantes aos do VLSFO, é estimado em 50 USD/kW de potência instalada para motores de amoníaco, com ciclo Diesel de 2 tempos.

No que diz respeito ao fornecimento e armazenamento dos combustíveis, é necessário instalar a bordo tanques e sistemas de tubagens dedicados. Supõe-se que o custo desses materiais seja proporcional à potencia do motor do navio. Os custos dos tanques de armazenamento pressurizados e do sistema de abastecimento de combustível são adicionados ao custo da adaptação do motor, sendo dimensionados para o custo por kW, calculando o custo total de armazenamento e sistema de abastecimento por categoria e potência dos navios (EMSA, 2022).

O CAPEX total para navios movidos a amoníaco engloba o custo dos motores de combustão interna, tanques de armazenamento pressurizados, sistema de abastecimento de combustível e o SCR. Em conjunto com o porte do navio e os valores de potência, pode obter-se uma aproximação para o CAPEX.

A seguir, na tabela 7, apresentam-se alguns exemplos do custo total de propriedade encontrados na literatura para navios adaptados:



### CAPEX para Adaptação de Motores de Combustão Interna

Tipo de Navio	Tipo do Motor	Custo de Adaptação do Motor [mUSD]
Porta-Contentores 14000 TEU	12RT-flex96C	4.6 USD
VLCC 310000 dwt	W7X82	3.3 USD
Cargueiro 210000 dwt	W6X72	3.1 USD

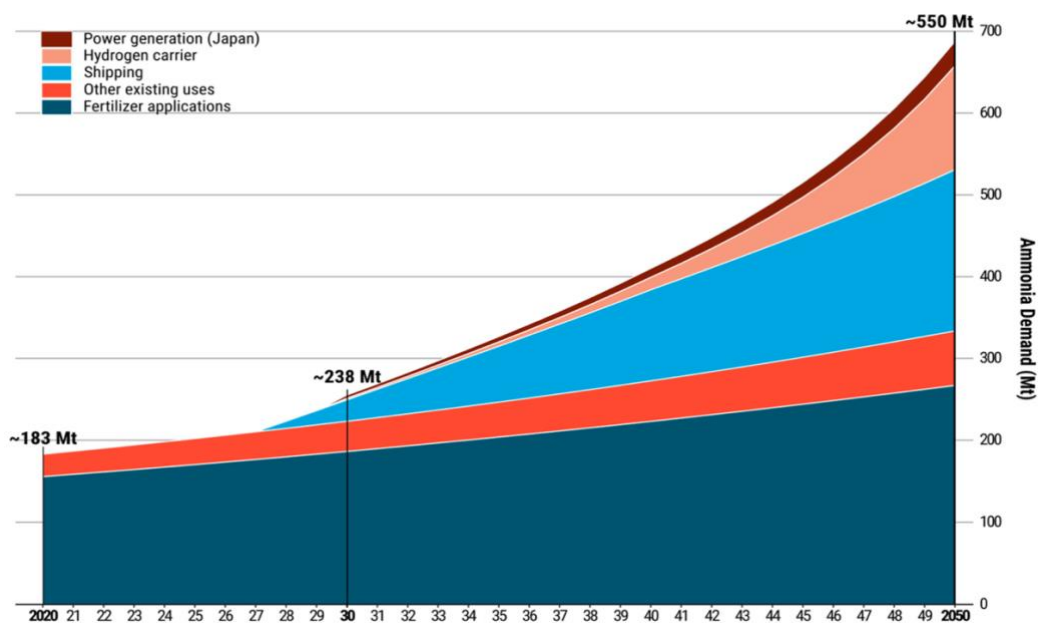
### Custos Adicionais

Item	Custo [mUSD]
Estaleiro	2
Trabalho Adicional do armador	0.9
Sistema de abastecimento de Combustível e Armazenamento	5.4

**Tabela 7.** Custos de Adaptação do Motor ICE ao Amoníaco e Custos Adicionais

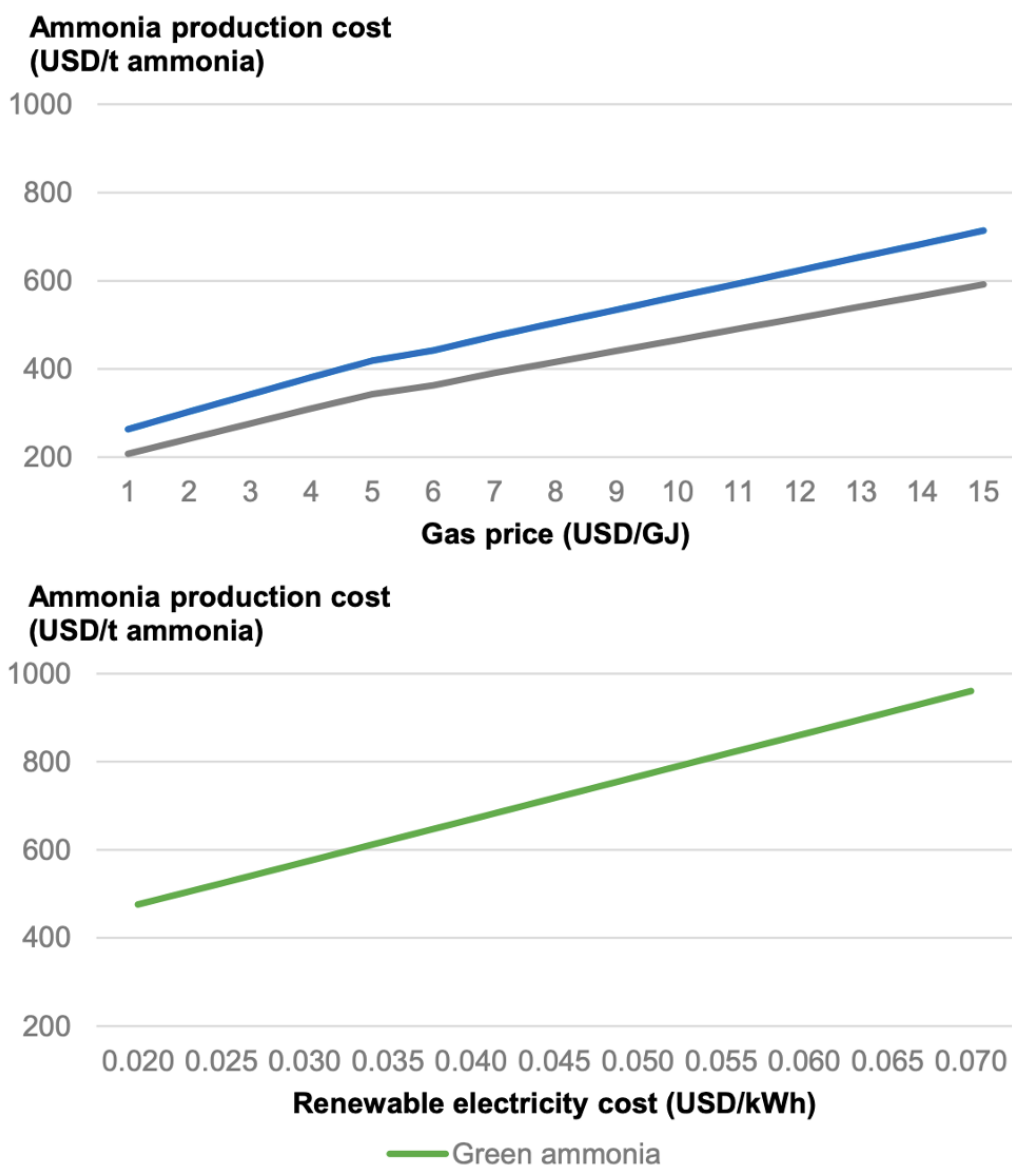
Fonte: EMSA, 2022. *Potential of Ammonia as Fuel in Shipping.*

Na figura 5, observa-se o aumento projetado na procura por amoníaco até o ano de 2050 em diversos setores industriais. A figura 6, por sua vez, ilustra o custo de produção do amoníaco verde, azul e cinzento, os quais são influenciados diretamente pela procura projetada.



**Figura 5.** Procura Esperada de Amoníaco até 2050.

Fonte: Saygin et al., 2023.



**Figura 6.** Custos Estimados Da Produção De Amoníaco em Função dos Preços do Gás e da Eletricidade.

Fonte: Saygin et al., 2023.

### *Emissões*

A utilização do amoníaco como combustível marítimo apresenta questões cruciais relativamente à emissão de gases de efeito de estufa e poluentes atmosféricos, na sua combustão. Com efeito, o amoníaco, por ser isento de carbono, gera emissões de CO<sub>2</sub> somente se um combustível piloto for usado, aplicando-se tanto ao amoníaco cinzento quanto ao verde. No entanto, é preciso ter em conta a formação de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) durante a combustão do amoníaco. O potencial impacto negativo das emissões de N<sub>2</sub>O, associado à potencial combustão incompleta do amoníaco, deve ser considerado no desenvolvimento de motores. Adicionalmente, as emissões de GEE durante a produção e transporte do amoníaco variam entre os tipos cinzento e verde, sendo o amoníaco verde, produzido com hidrogénio verde,



associada as emissões próximas de zero na síntese de Haber-Bosch, que se caracteriza por ser um método industrial para a produção do amoníaco em larga escala, a partir de azoto e hidrogénio, desenvolvido justamente por Fritz Haber e Carl Bosch.

Em termos de produção, se a eletricidade for proveniente da rede, as emissões de GEE não são nulas, e o calor fornecido ao eletrolisador de alta temperatura pode contribuir para as emissões de GEE do amoníaco verde. Comparativamente, estima-se que o amoníaco verde tenha emissões de GEE 91% menores que o amoníaco cinzento e 85% menores que o óleo combustível pesado (HFO) e óleo diesel marítimo (MGO).

O uso do amoníaco em motores de combustão interna marítimos oferece benefícios significativos na redução de poluentes atmosféricos, eliminando as emissões de dióxido de enxofre, monóxido de carbono, metais pesados, hidrocarbonetos e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH<sup>16</sup>). A emissão de partículas (PM<sup>17</sup>) é substancialmente reduzida pela ausência de carbono, enxofre e outros contaminantes presentes em combustíveis convencionais. Contudo, as emissões específicas irão depender do tipo de combustão do motor, do projeto e, em especial, do combustível piloto utilizado (Kobayashi et al., 2019).

O estudo do ciclo de vida do amoníaco indica que, quando utilizado juntamente com HFO, pode reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> por tonelada-quilómetro em 27% e a combinação do amoníaco verde com HFO pode proporcionar uma redução de 34,5% nas emissões totais de CO<sub>2</sub> por tonelada-quilómetro, apresentando-se como uma solução atrativa a curto prazo com viabilidade comercial razoável, mas ainda sujeita a desafios associados à produção sustentável do amoníaco e à sua competitividade relativamente ao amoníaco convencional (Bicer, 2018).

### *Outras Considerações*

Apesar de, até recentemente, o amoníaco não ser amplamente explorado como combustível marítimo, a sua síntese a partir de fontes renováveis, mencionada anteriormente como amoníaco verde, emerge como uma opção livre de carbono. O projeto piloto liderado pelo *Green Shipping Programme* investigou o uso do amoníaco como combustível num navio graneleiro da classe L, concluindo que existem desafios a ser superados antes da sua implementação em larga escala.

A implementação do amoníaco como combustível marítimo requer coordenação entre autoridades competentes, operadores de terminais, fornecedores de combustíveis, proprietários de infraestrutura e navios recetores. As preocupações de segurança, especialmente para o amoníaco, são consideradas mais críticas do que para o hidrogénio e metanol. Estudos de risco destacam que grandes fugas de amoníaco podem ter impactos significativos, evidenciando a

---

<sup>16</sup> *Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH)* – Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos são compostos orgânicos derivados de processos de combustão incompleta de materiais orgânicos, como carvão, petróleo e madeira.

<sup>17</sup> *Particular Matter (PM)* – Materiais Particulados são pequenas partículas sólidas suspensas no ar, compostas por poeira, fumaça, fuligem ou gotículas de líquidos. Elas podem ser tanto de origem natural, como de origem antropogênica (como emissões industriais ou veiculares, por exemplo).



necessidade de serem criadas diretrizes claras para operações de *bunkering* e operações portuárias seguras. A instabilidade na regulamentação contribui para a incerteza neste contexto (DNV, 2021).

O amoníaco destaca-se como uma alternativa equilibrada relativamente à densidade de energia volumétrica e ao custo de produção sintética renovável, quando comparado com outros combustíveis renováveis. Apesar dessas vantagens, questões cruciais permanecem para determinar a sua viabilidade como combustível marítimo. Atualmente, estudos de combustão, incluindo misturas de hidrogénio e amoníaco estão a ser realizadas para aperfeiçoar as propriedades e a eficiência deste combustível (Vrin, 2023).

A transição para o amoníaco como combustível marítimo pode ser facilitada pelos 58 navios da classe DNV que já operam com notação *ammonia ready*, indicando preparação para futuras conversões (DNV, 2023). No entanto, não foram desenvolvidos motores de grande porte movidos a amoníaco, apesar de motores de combustão interna a queimar amoníaco sejam tecnicamente viáveis, tendo a *MAN Energy Solutions* demonstrado interesse na tecnologia de utilização de motores de combustão interna alimentados por misturas de hidrogénio e amoníaco.

### 3.3. Hidrogénio

O hidrogénio, o elemento mais simples e o mais abundante no universo, é geralmente utilizado na sua forma gasosa diatómica  $H_2$ , destacando-se como um potencial combustível alternativo atrativo e viável. A sua utilização promissora reside na emissão nula de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), óxidos de enxofre ( $SO_x$ ) e quantidades insignificantes de óxido de azoto ( $NO_x$ ).

São possíveis diversas aplicações para o hidrogénio como combustível marítimo, que pode ser empregue seja na forma líquida em motores de combustão interna, concebidas tanto para motores de 2 e 4 tempos, como na sua forma gasosa em motores bicombustíveis com combustível piloto (IMO, 2020). Em alternativa, a utilização pode ocorrer em células de combustível, que serão abordadas na seção seguinte.

O hidrogénio destaca-se por possuir o maior valor de energia por massa de todos os combustíveis químicos, atingindo 120,2 MJ/kg, em comparação com os outros combustíveis marítimos. Em termos de energia em massa, excede o MGO em 2,8 vezes e os álcoois em cinco a seis vezes (ABS, 2021). No entanto, numa perspetiva volumétrica, devido à sua menor densidade de energia, o hidrogénio líquido pode exigir quatro vezes mais espaço do que o MGO ou aproximadamente duas vezes mais espaço do que o gás natural liquefeito (LNG) para uma quantidade equivalente de energia transportada.

Outro ponto relevante é que o hidrogénio exige baixas temperaturas, inferiores a  $-253^\circ C$  para se liquefazer. Devido a esta temperatura extremamente baixa, o volume necessário para armazená-lo na sua forma líquida pode ser ainda maior ao considerar as camadas adicionais de



materiais necessárias para o armazenamento criogénico, representando um desafio significativo. Essa complexidade é particularmente evidente em navios com rotas que incluem trajetos extensos e ininterruptos.

Devido à complexidade associada ao armazenamento a baixa temperatura ou alta pressão, uma alternativa viável é o transporte do hidrogénio misturado com outras substâncias, como o amoníaco ou metanol (IRENA, 2022).

Adicionalmente, é imperioso abordar as restantes questões de projeto relacionadas com a volatilidade do combustível. Apesar da ausência de estudos muito aprofundados sobre a viabilidade comercial do hidrogénio como combustível, várias pesquisas têm-se dedicado a métodos sustentáveis de produção desse elemento. Isto inclui o suporte à utilização de outros combustíveis na indústria marítima, nos quais o hidrogénio é utilizado como matéria-prima, como é o caso das células de combustível e do amoníaco. Atualmente, são utilizadas duas técnicas mais comuns na produção do hidrogénio: a reforma de metano a vapor e eletrólise da água (Dincer & Acar, 2015). Esta última tem recebido maior atenção devido ao seu recente avanço tecnológico, possibilitando o uso eficiente de energia renovável para decompor a água em hidrogénio e oxigénio.

A eletricidade necessária para o processo de eletrólise, pode ser gerada a partir de centrais solares, eólicas e hidroelétricas (futuros locais de produção de combustíveis sintéticos são mencionados abaixo). Este enfoque melhora significativamente o potencial global de mitigação do hidrogénio, considerando todo o ciclo de vida da sua produção. Uma avaliação conduzida por Bicer (2018) indicou que o hidrogénio produzido pelo uso de energia hidroelétrica pode resultar em 10 vezes menos emissões de CO<sub>2</sub> do que o HFO durante o seu ciclo de vida completo. Além disso, quando o hidrogénio é utilizado numa mistura com HFO (50% do combustível total) pode alcançar-se uma redução de até 43% nas emissões de CO<sub>2</sub> por tonelada-quilómetro. Isso demonstra que, mesmo com a substituição parcial dos atuais combustíveis marítimos convencionais (HFO) pelo hidrogénio, é possível atingir uma significativa redução nas emissões de CO<sub>2</sub> e de outros gases de efeito de estufa.

Apesar deste avanço, o uso de hidrogénio como substituto do combustível diesel convencional ainda carece de pesquisa e desenvolvimento, particularmente para torná-lo comercialmente viável. Até o momento, não existe um procedimento padronizado de projeto e abastecimento para navios movidos a hidrogénio, juntamente com sua infraestrutura de “*bunkering*” (ITF<sup>18</sup>, 2018)

A IMO, atualmente, não está desenvolvendo requisitos específicos para a utilização do hidrogénio como combustível marítimo. Portanto, uma possível restrição adicional reside na necessidade de estabelecer práticas seguras para a utilização do hidrogénio nesse contexto.

---

<sup>18</sup> *International Transport Forum (ITF)* – O fórum internacional de Transportes é uma organização intergovernamental multimodal integrado na Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OECD), politicamente autónomo, que atua como uma plataforma para discussão e pré-negociação de questões políticas relacionadas com todos os modos de transporte.



Embora o hidrogénio ainda não seja usado amplamente na indústria marítima, com apenas alguns projetos-piloto em execução, já está a ser globalmente usado em diversas aplicações industriais.

No entanto, apesar de não existirem até o momento requisitos estabelecidos pela IMO para a sua utilização, existem informações, regras e regulamentos disponíveis referentes à precaução com a sua utilização e manuseamento. Essas diretrizes estão contidas nas recomendações provisórias para o transporte de hidrogénio liquefeito a granel, elaboradas pelo *Maritime Safety Committee* (MSC) e publicadas pela IMO na resolução MSC.420(97). Essas recomendações abrangem medidas de segurança, métodos de transporte e procedimentos padrão para a produção do hidrogénio.

Há também vários códigos e regulamentos referenciados para padrões de componentes de hidrogénio e projeto de equipamentos, códigos de incêndio e outras normas específicas para o correto manuseamento do hidrogénio, além de códigos ou padrões gerais de segurança que incluem o hidrogénio. O relatório técnico da Organização Internacional para Padronização (ISO) ISO/TR 15916, que aborda as Considerações Básicas para a segurança dos Sistemas de Hidrogénio, é outra ferramenta que se concentra em fornecer informações técnicas fundamentais para a compreensão das questões de segurança do hidrogénio, além de outros padrões internacionais que podem ser referenciados por especialistas em projetos marítimos.

Relativamente à sua produção, atualmente o chamado hidrogénio verde, não é produzido em larga escala. Nos Estados Unidos, a maior parte do hidrogénio é produzido na Califórnia, Louisiana e Texas para uso industrial. Além disso, está disponível na Europa, especialmente na Bélgica, França e outros locais, tanto como subproduto industrial como combustível em diversas regiões. A sua utilização atual pode sofrer alterações à medida que mais estações de abastecimento de hidrogénio tornarem-se disponíveis para uso rodoviário. Para a bem-sucedida adoção deste combustível na marinha mercante, será necessário instalar postos de abastecimento nos portos, provavelmente com maior apoio de entidades governamentais e políticas que possam reduzir os custos de produção, distribuição e aquisição do hidrogénio.

#### *Viabilidade Financeira*

O principal custo da conversão de um navio para hidrogénio como combustível marítimo inclui o seu armazenamento e disponibilidade, que tornam o custo do hidrogénio mais elevado na atualidade do que o do gás natural, tornando-o menos atrativo para a indústria marítima. É possível utilizá-lo com combustível de transição, através do hidrogénio cinzento ou castanho que está disponível atualmente e mudar para o hidrogénio azul ou verde à medida que esses métodos de produção se tornarem mais difundidos e economicamente viáveis (Atoufi & Jenkins, 2024).

Países como o Chile e a Austrália, que produzem hidrogénio verde, podem ajudar a reduzir o seu custo. Uma diminuição no custo de produção e um aumento na disponibilidade de hidrogénio teria o potencial de torná-lo uma boa alternativa para combustível de navios,



lembrando sempre que o hidrogénio é a base para outras opções de combustíveis alternativos, como o amoníaco, o metanol e as células de combustível. Deste modo, se o seu custo de produção baixar substancialmente pode concretizar-se a transição para a descarbonização.

À medida que a iniciativa e os esforços continuarem, o custo do hidrogénio marítimo irá diminuir à medida que mais países forem desenvolvendo hidrogénio a partir de processos renováveis, sendo que já existem várias iniciativas nesse contexto a nível mundial (IRENA, 2020).

Atualmente, estima-se que o combustível hidrogénio custe cerca de quatro a oito vezes o preço do óleo combustível com muito baixo teor de enxofre (VLSFO) (IEA, 2022). Um foco nos custos dos preços do combustível de hidrogénio verde e azul é um componente crucial para reduzir as emissões de carbono até 2050. Se o custo for reduzido, a indústria de transporte terá uma transição muito mais acessível e de fácil utilização como combustível. Como o hidrogénio verde depende da indústria de energia renovável, à medida que a energia renovável se tornar menos onerosa, espera-se que a indústria de hidrogénio verde também reflita preços mais acessíveis (IRENA, 2020).

Embora o custo de combustível seja estimado em cerca de 50% maior para o caso de uma adaptação, o custo do armazenamento e dos novos consumidores de combustível precisam ser considerados ao converterem-se para combustível a hidrogénio. O armador pode também precisar de reconsiderar a faixa necessária de combustível e o volume necessário associado, o que também pode afetar no projeto do navio o espaço de carga necessário para armazenar o combustível (Atoufi & Jenkins, 2024).

Foi realizado recentemente um estudo colaborativo entre o grupo BMT<sup>19</sup> e o *PA Consulting Group*<sup>20</sup> a fim de explorar a viabilidade da conversão e o impacto de diferentes tecnologias a hidrogénio em navios Ro-Pax de médio porte. No estudo em questão foi avaliado um catamaran de 85 metros com 2.9 MW de potência que realiza viagens de pequena a médias distâncias da costa, com a duração de 1 hora de viagem.

Relativamente à tecnologia disponível para a implementação de um navio movido a hidrogénio, existem várias combinações de instalações de produção de energia e sistemas de armazenamento de hidrogénio que podem ser selecionados, sujeitos à disponibilidade de espaço, levando em consideração que o hidrogénio ocupa quatro a seis vezes mais espaço (na melhor das hipóteses) para armazenar a mesma quantidade de energia a bordo. Portanto, torna-se evidente, na atualidade, que o hidrogénio é mais adequado para viagens costeiras, que inclui navios Ro-Pax de tamanho médio e pequenos navios de passageiros. Além disso, a instalação

---

<sup>19</sup> *Grupo BMT Ltd.* – Fundado em 1985, é uma consultora multidisciplinar internacional de engenharia, ciência e tecnologia que oferece serviços, particularmente nos setores de defesa e segurança, infraestrutura crítica, transporte comercial e meio ambiente.

<sup>20</sup> *PA Consulting Group* – Empresa de consultoria de gestão que opera nos setores de indústria de consumo e manufatura, defesa e segurança, energia e utilidades, serviços financeiros, serviços públicos, saúde e ciências da vida e transportes.



do sistema de armazenamento de hidrogénio deve ser planeada de forma a manter o centro de gravidade do navio dentro dos limites permitidos para sua operação e conformidade com as regras de estabilidade após realizada a sua adaptação.

Foram selecionadas e analisadas duas opções em que o hidrogénio é utilizado em motores de combustão variando em complexidade, uso de hidrogénio e custo de adaptação:

**Opção 1:** Instalação de motores de combustão interna bicombustíveis, combinados com um sistema de armazenamento de hidrogénio pressurizado.

Esta opção é a menos complexa, exigindo um menor número de modificações no navio existente para instalar uma central de produção de hidrogénio e equipamentos de armazenamento. A principal alteração está relacionada com a instalação de tanques de combustível e do sistema de distribuição de combustível. A capacidade total líquida de armazenamento de hidrogénio instalada a bordo é de 2720 kg.

Além da instalação dos tanques de armazenamento de hidrogénio, a outra modificação principal necessária consiste na instalação dos motores de combustão interna bicombustíveis, pelo que o grupo de 4 motores MAN D2862 substituiu os 4 Yanmar 6EY17W do navio a ser adaptado. Outra grande mudança necessária é a instalação de tubagens de combustível de hidrogénio, conectando os tanques de combustível situados no convés aos motores localizados na casa de máquinas. A tubagem de parede dupla é necessária de acordo com os regulamentos do Código IGF.

Também foi preciso instalar sistemas de pós-tratamento de gases de evacuação (SCRs) em cada um dos motores principais, juntamente com o sistema de distribuição de ureia e os tanques de armazenamento, para que o navio cumpra com os limites regulatórios de emissão de NOx Tier III. Finalmente, foi instalada no convés principal uma estação de *bunkering* de hidrogénio, separada de outros compartimentos não perigosos por meio de uma câmara de ar. A purga do sistema de tubagens (obrigatório durante o abastecimento ou manutenção) é feita através de azoto.

**Opção 2:** Instalação de motores de combustão interna que funcionam com 100% de hidrogénio, combinados com um sistema de armazenamento de hidrogénio liquefeito.

Nesta opção, as modificações estão mais uma vez focadas no sistema de propulsão, sendo as principais alterações a instalação dos tanques de combustível de hidrogénio liquefeito no convés e a instalação de motores ABC movidos a hidrogénio na casa de máquinas. Uma vez que o motor a ser instalado consome 100% hidrogénio, a capacidade total de armazenamento a bordo, terá de ser naturalmente, superior. Nesta opção, a capacidade total líquida de armazenamento de hidrogénio instalada a bordo foi de 4615 kg.

Considerando que os motores ABC são consideravelmente mais pesados e maiores do que os motores MAN usados na opção 1, é mantida uma configuração de propulsão quádrupla (4 x



## ESCOLA SUPERIOR NÁUTICA INFANTE D. HENRIQUE

ABC 6DZ), no entanto, o trabalho de reequipamento necessário para instalar os motores de combustão movidos a hidrogénio na casa de máquinas existente é muito mais extenso do que o necessário para a opção 1. As maiores dimensões e a velocidade de rotação inferior dos motores ABC exigem uma caixa de velocidades diferente, enquanto o arranjo do hélice e do veio precisam de ser alterados. Combinado com alterações no fixe do motor, o trabalho estrutural a ser realizado na casa de máquinas é o mais significativo entre as duas opções.

A tabela 8 apresenta os custos relacionados à instalação e operação de cada uma das opções analisadas.



CAPEX [mUSD]		
Item	H2/VLSFO	H2
Tanques de Armazenamento	3.56	5.21
Motor	1.02	3.81
Estaleiro	4.45	6.99
<b>Total</b>	<b>9.03</b>	<b>16.01</b>

OPEX [ano base 2030][kUSD/dia]		
Custo diário H2 verde	7.63	10.81
Custo diário H2 azul	6.1	6.99
Custo diário H2 cinza	6.36	7.76
Consumo de Combustível/dia [kg/dia]	389/3494	1451

**Tabela 8.** Custos Operacionais e CAPEX de cada uma das Opções.

Fonte: Estudo colaborativo entre o BMT group and PA consulting, 2023.

Observe-se que, embora o motor bicomcombustível seja capaz de fornecer o conjunto gerador para hotel e propulsão, ao usar um motor de combustão a hidrogénio para a propulsão, um pequeno motor de combustão a Diesel separado é necessário para fornecer a carga do conjunto gerador, fazendo com que ainda assim exista um consumo VLSFO adicional.

### *Emissões*

O hidrogénio apresenta um potencial significativo para ser um combustível marítimo com emissões nulas de carbono quando utilizado em células de combustíveis ou motores de combustão interna mono-combustíveis. Em motores de combustão de combustível duplo, o hidrogénio tem a capacidade de reduzir substancialmente as emissões de carbono (DNV, 2022). Este promissor combustível é caracterizado por ter um impacto muito baixo de emissões “*Tank-to-Wake*” (TTW), que abrange as emissões produzidas pela fonte de energia. No entanto, é crucial considerar todo o ciclo de vida da produção do hidrogénio para avaliar adequadamente as emissões globais de gases de efeito de estufa.

Quando são utilizados combustíveis fósseis na produção do hidrogénio, as emissões de carbono e gases de efeito de estufa podem não ser consideravelmente reduzidas. As emissões “*Well-to-Tank*” (WTT<sup>21</sup>) englobam todos os poluentes produzidos durante a produção, armazenamento e transporte do combustível até ao consumidor final. Isto inclui as emissões geradas durante o processamento do carvão ou gás natural para produção do hidrogénio ou a queima de

<sup>21</sup> *Well-To-Tank (WTT)* – Refere-se ao ciclo completo de emissões de gases de efeito de estufa desde a matéria-prima até ao momento que o combustível é colocado a disposição do utilizador, no tanque o veículo ou equipamento, incluindo o transporte e o processamento.



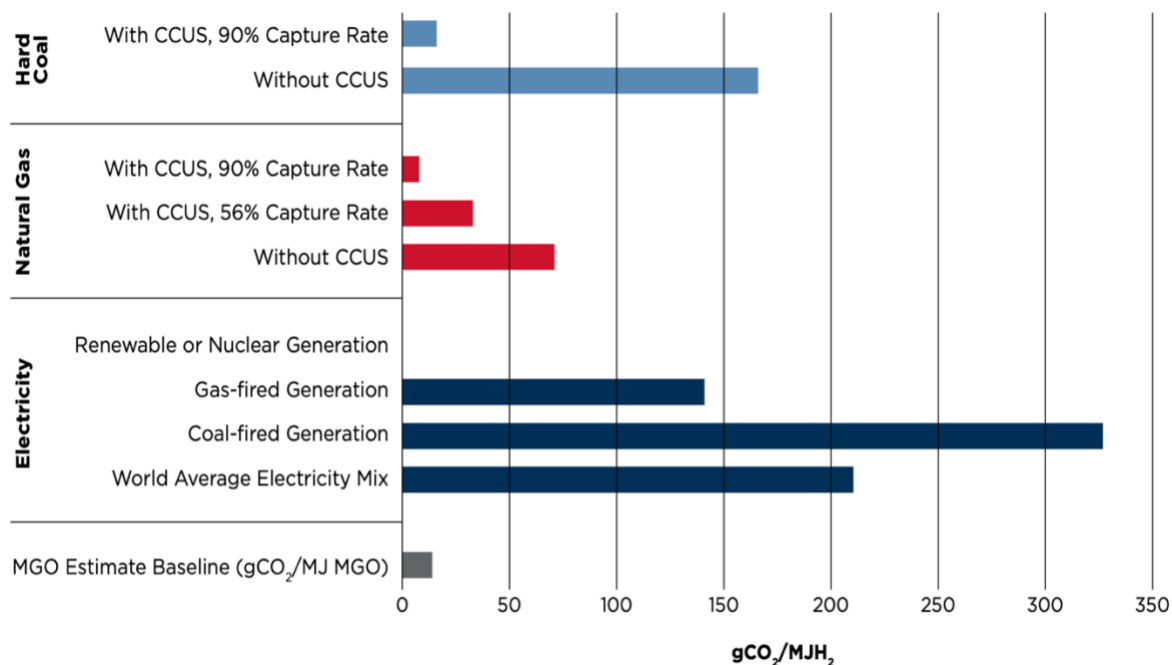
combustíveis fósseis para gerar eletricidade usada na eletrólise. Para eliminar completamente as emissões associadas à utilização do hidrogénio como combustível, é fundamental usar métodos de produção, armazenamento e transportes livres de carbono. O hidrogénio pode ser produzido de forma renovável ou verde, eliminando as emissões de carbono e gases de efeito de estufa a montante, resultando em emissões WTT muito baixas. Quando as emissões WTT e TTW são eliminadas do ciclo de vida do combustível, obtém-se uma opção de combustível de carbono zero *well-to-wake* (WTW<sup>22</sup>). Programas de verificação de sustentabilidade ou certificados de garantias de origem, como o projeto EU CertifHy, podem ser implementados no mercado de hidrogénio para registar e quantificar a pegada de emissões do hidrogénio produzido. Estes regimes podem ser aplicados a nível regional ou nacional, mas ainda não são exigidos pela Organização Marítima Internacional (IMO, 2021).

As emissões derivadas da produção de hidrogénio constituem a maioria dos poluentes “*well-to-wake*”. Similarmente ao amoníaco, o hidrogénio pode ser classificado em quatro tipos com base nas emissões libertadas durante a sua produção: hidrogénio castanho, que é produzido a partir do processamento do carvão; hidrogénio cinzento, proveniente do processamento de outros combustíveis fósseis ou gás natural; hidrogénio azul, que envolve o processamento de combustíveis fósseis com tecnologias de controlo de emissões, incluindo métodos de captura e armazenamento de carbono (CCS); e hidrogénio verde, produzido a partir de fontes de energia renováveis, normalmente através de eletrólise da água usando eletricidade produzida através da energia solar ou eólica para alcançar uma produção líquida de carbono zero (IEA, 2022).

De modo geral, a produção de hidrogénio é um processo de elevado consumo de energia. Atualmente, a energia globalmente utilizada para produzir hidrogénio é de cerca de 275 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), correspondendo a dois por cento da procura mundial de energia. A maior parte desta energia é produzida pelas refinarias de combustíveis fósseis e pela produção do amoníaco como fertilizante. A produção de hidrogénio cinzento é muito intensiva em carbono, variando entre 71 kg CO<sub>2</sub>/MJ H<sub>2</sub> para o gás natural e 166 kg CO<sub>2</sub>/MJ H<sub>2</sub> para o carvão, mas estas emissões podem ser reduzidas ou eliminadas através da implementação da tecnologia de captura e armazenamento de carbono. A figura 7 representa a quantidade de CO<sub>2</sub> WTT gerada para cada MJ de energia e a variação de possíveis emissões de vários tipos de produção de hidrogénio, indo de até 325 kg CO<sub>2</sub>/MJ H<sub>2</sub> a zero para energia renovável ou energia nuclear. Estes valores são comparados com o CO<sub>2</sub> típico gerado durante a produção WTT de gasóleo marítimo (MGO), que é de 14.2 kg CO<sub>2</sub>/MJ MGO (ABS, 2021).

---

<sup>22</sup> *Well-to-Wake (WTW)* – Refere-se ao ciclo completo de emissões de gases de efeito de estufa associado à operação de um navio, abrangendo desde a extração da matéria-prima até ao impacto ambiental da queima do combustível no veículo ou equipamento.



**Figura 7.** Emissão de Carbono com e sem o uso de CCS/CCUS em Comparação com o Gasóleo Marítimo

Fonte: ABS, 2021. *Hydrogen as Marine Fuel. Sustainability Whitepaper.*

Em alternativa, a eletricidade pode ser utilizada para efetuar a eletrólise da água. Os eletrolisadores funcionam como células de combustível invertidas, absorvendo água e eletricidade e produzindo hidrogénio e oxigénio. Fontes de energia renováveis, como a eletricidade produzida através de geradores eólicos, solar ou nuclear, podem ser usadas na produção de hidrogénio verde através deste processo, fazendo do hidrogénio um combustível com impacto zero de carbono na sua produção. Outros processos de produção de hidrogénio incluem a divisão da água a alta temperatura, a divisão fotobiológica da água e a divisão foto eletroquímica da água, embora esses métodos ainda não sejam amplamente utilizados na produção de hidrogénio em larga escala.

Quando a produção e o consumo de hidrogénio são processos com emissões nulas, as únicas emissões no ciclo de vida resultam dos processos de armazenamento e transporte do combustível durante a distribuição e de qualquer processo de conversão necessário entre transportadores.

Em resumo, o hidrogénio, quando produzido de forma sustentável, oferece uma solução promissora para a descarbonização do setor marítimo e de outras indústrias. A chave para seu impacto positivo reside na adoção de métodos de produção, armazenamento e transporte livres de carbono, o que pode ser facilitado por iniciativas de certificação e regulamentação que assegurem o rastreio e a minimização das emissões ao longo de todo ciclo de vida do combustível.



### *Outras Considerações*

O hidrogénio tem sido utilizado há várias décadas em diversos processos industriais. Na refinação de petróleo, é essencial para remover o enxofre dos combustíveis. Também desempenha um papel crucial como reagente redutor e oxidante em processos metalúrgicos e é fundamental na produção de amoníaco e metanol, dois outros biocombustíveis promissores.

Contudo, existe um problema significativo: a maior parte do hidrogénio utilizado atualmente é o chamado hidrogénio cinzento, produzido a partir de combustíveis fósseis, tipicamente o gás natural, por meio de um processo chamado reforma a vapor. O hidrogénio verde, por outro lado, é produzido através de energia renovável limpa para dividir a água em hidrogénio e oxigénio por meio da eletrólise, sendo esta a única opção totalmente isenta de carbono.

Outro desafio significativo é o armazenamento do hidrogénio. Foram avaliados diversos métodos de armazenamento para utilização em aplicações marítimas, incluindo o gás natural sintético, metanol, ácido fórmico, transportadores orgânicos líquidos aromáticos e vários transportadores sólidos. Concluiu-se que não existe uma solução ideal que combine alta densidade de energia, baixa entrada de energia, disponibilidade de recursos, não toxicidade e facilidade de manuseamento e armazenamento. Armadores, portos e instituições reguladoras, como a IMO, irão precisar de fazer escolhas estratégicas sobre os métodos de armazenamento de hidrogénio para o transporte marítimo (*Energy & Environ. Sci. Journal*, 2021).

Isso deve-se ao facto de o hidrogénio ser a menor molécula existente na natureza, podendo facilmente escoar-se através de juntas e fendas em qualquer sistema de tubagens ou de armazenamento. Embora a elevada difusividade seja uma vantagem, pois o gás se dispersa facilmente na atmosfera, também representa um desafio. Além disso, existem detetores de hidrogénio que podem identificar o gás a níveis 100 vezes inferiores ao limite de explosividade. O hidrogénio é inodoro, invisível e não tóxico, mas pode causar asfixia ao substituir o oxigénio em concentrações elevadas.

A produção global de hidrogénio foi de cerca de 70 milhões de toneladas em 2018. Segundo Jussi Mäkitalo, atual gestor de desenvolvimento de negócios da Wärtsilä, quase todo o hidrogénio é produzido junto do local da sua utilização e destina-se a processos industriais, não sendo transportado por navios como o LNG.

Todas essas questões devem ser abordadas com brevidade para que o uso do hidrogénio como combustível se torne uma realidade viável nos próximos anos.

### **3.4. Células de Combustível**

Para além da perspetiva sobre a utilização de combustíveis renováveis em motores de combustão interna adaptados, o metanol, amoníaco e o hidrogénio também podem ser usados em células de combustível, representando assim uma alternativa promissora no futuro.



A ideia de utilizar células de combustível para gerar eletricidade foi concebida por Willian Grove em 1842. No entanto, devido ao sucesso e à eficiência dos motores de combustão, as células de combustível não foram amplamente consideradas para uso geral e, até recentemente, foram aplicadas apenas em contextos especiais, como exploração espacial e submarinos. Entretanto, a elevação e oscilação dos preços dos combustíveis, juntamente com um forte enfoque na redução das emissões de poluentes, tem despertado um interesse crescente no desenvolvimento de células de combustível como uma sólida alternativa para a descarbonização em diversos setores.

Estudos de mercado revelaram que as células de combustível não devem ser vistas apenas como uma tecnologia futura, visto já estarem comercialmente disponíveis para uma ampla gama de aplicações, como por exemplo na eletrónica portátil, geração de energia em residências e fornecimento de energia ininterrupta (*Fuel Cell Today*, 2013). Durante os anos de 2014 e 2015, o setor de células de combustível estacionárias tornou-se consideravelmente mais sustentável, com um leque mais abrangente de fornecedores de sistemas de células de combustível, crescimento no fluxo de investimentos para o setor, redução de preços em todos os níveis e um aumento no número de empresas com receita anual global superior a US\$ 100 milhões. No que se refere especificamente ao setor marítimo, como este relatório indica, uma vasta gama de projetos de células de combustível marítimas estão em curso e a sua aplicação em projetos que envolvam o transporte marítimo comercial está em ascensão. A empresa de cruzeiros Royal Caribbean Cruises Ltd. e o estaleiro Meyer Turku estão colaborando no desenvolvimento da próxima geração de navios de cruzeiros a combustível LNG, apresentando uma série de inovações, que incluem a integração de células de combustível para geração de energia.

Entretanto, à escala global, reconhece-se que a tecnologia de células de combustível ainda é incipiente. Para que se torne uma alternativa viável e realista para futuras soluções energéticas, incluindo navios, é necessário superar diversos obstáculos. Um dos mais significativos é a capacidade de implementar esta tecnologia no mercado, possibilitando a produção em massa que resultará numa economia de escala e, conseqüente redução de custos.

A eletricidade é gerada pela combinação de oxigénio para produzir a célula de combustível. Existem diversos tipos, os quais variam conforme as suas aplicações.

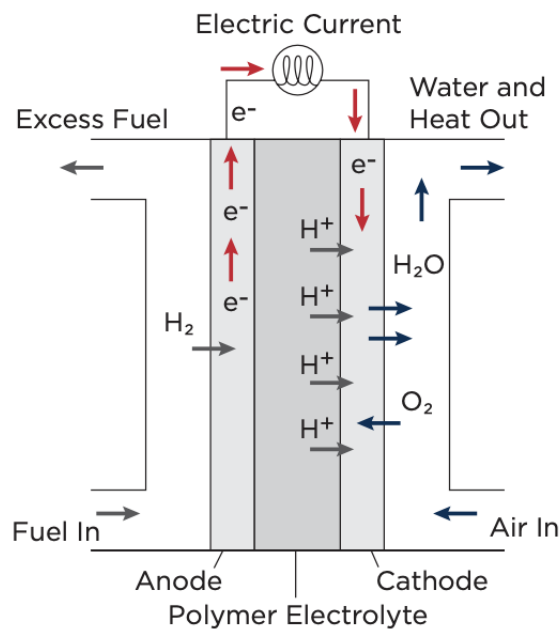
Basicamente, a célula de combustível converte diretamente a energia eletroquímica, transformando a energia química de determinados compostos em energia elétrica. Essa conversão é realizada sem a necessidade de um ciclo termodinâmico. Portanto, não está sujeita ao ciclo de Carnot (U.S. Department of Energy [DOE], 2022a).

Os diferentes tipos de células de combustível são geralmente classificados com base na sua temperatura de operação, sendo as de baixa temperatura entre 20 e 100 graus, as de média temperatura entre 200 e 300 graus, e as de alta temperatura entre 600 e 1500 graus. As células de temperatura alta podem atingir grandes eficiências, sendo também possível gerar energia adicional através de combinação com uma turbina de vapor (DOE, 2022a; Haider et al., 2021).



Outro critério muito utilizado para a classificação está relacionado com o tipo de eletrólito usado, dividindo-se em vários tipos e características. As principais características, bem como as vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de células de combustíveis estão apresentadas no Anexo I.

Atualmente a capacidade instalada de células de combustível no mundo aumentou de 200 MW em 2014 para 800 MW em 2018. Durante esses anos, o tipo de célula de combustível com a maior capacidade instalada foi a de membrana de permuta de prótons (PEMFC). Conforme apresentado no Anexo I, a PEMFC opera numa faixa de temperaturas de 80°-100°C, sendo classificada como uma célula de combustível de baixa temperatura, sendo que também é capaz de operar em faixas de temperaturas mais elevadas, até 200°C. No funcionamento da PEMFC, o eletrólito é um polímero sólido que separa o ânodo do cátodo. O hidrogénio é introduzido no ânodo, enquanto o oxigénio é introduzido no cátodo. O material catalítico à base de platina facilita a divisão dos átomos de hidrogénio quando este reage com o oxigénio. Os prótons resultantes do hidrogénio ( $H^+$ ) atravessam a membrana de polímero sólido em direção ao oxigénio, enquanto os eletrões seguem até aos átomos de oxigénio no lado do cátodo através de um circuito elétrico, gerando assim energia (DOE, 2022b). O esquema simplificado deste processo está representado na figura 8.



**Figura 8.** Célula de Combustível Típica de Membrana de Protões (PEM).

Fonte: ABS, 2020. *Setting the Course to Low Carbon Shipping: Pathways to Sustainable Shipping*.

O processo PEMFC gera aproximadamente 50% de energia útil e 38% de calor excedente, que precisa de ser removido para o funcionamento ideal da célula de combustível. As últimas percentagens do balanço energético correspondem ao calor produzido e utilizado diretamente no processo PEMFC. A alta densidade de potência a baixa temperatura, a versatilidade de



aplicação em diversos campos e a facilidade de produção em grande escala são algumas das vantagens que a PEMFC apresenta quando comparada com outros tipos de células de combustível (Haider et al., 2021).

### *Viabilidade Financeira*

Conforme descrito anteriormente, a célula de combustível pode ser alimentada por combustíveis já analisados nas seções anteriores, como o hidrogénio e o amoníaco. No estudo colaborativo entre o grupo MBT (anteriormente conhecido como British Maritime Technology) e o PA Consulting Group, mencionado na subseção 3.3, a última e mais complexa alternativa em termos de adaptações de navios existentes avaliada no referido estudo é a utilização do hidrogénio em células de combustível, sem a necessidade de utilizar um motor de combustão interna.

De todas as células de combustível atualmente disponível no mercado, as seguintes são normalmente comercializadas em aplicações marítimas:

1. Célula de Combustível de Membrana de Protões (PEMFC)
2. PEMFC de alta temperatura (HT-PEMFC)
3. Célula de Combustível de carbonato fundido (MCFC)
4. Célula de Combustível de Óxido sólido (SOFC)

A tecnologia PEMFC é madura e tem sido aplicada com sucesso na indústria marítima. A eficiência é moderada, em torno de 50-60%, com uma baixa temperatura de operação na faixa de 65-85°C. A principal desvantagem é a necessidade do fornecimento de hidrogénio muito puro para seu funcionamento.

Por outro lado, o HT-PEMFC é uma tecnologia menos madura que o PEMFC convencional de baixa temperatura. Apresenta uma eficiência semelhante, contudo opera numa faixa de temperaturas ligeiramente mais alta, entre 160° a 200°C, o que reduz a sua sensibilidade a impurezas.

Conforme descrito anteriormente, as células de combustível são modulares e todo o sistema pode ser dimensionado de acordo com as necessidades de potência do navio. No entanto, é importante observar que o sistema também pode ser dimensionado com base na capacidade de armazenamento de hidrogénio a bordo. Por exemplo, um sistema de armazenamento de energia maior poderia ser utilizado para reduzir o número necessário de células de combustível e, conseqüentemente, o consumo de hidrogénio, resultando numa menor frequência de abastecimento.

Por fim, para efeitos de estudo, assume-se que as necessidades de energia são principalmente supridas pelas células de combustível, enquanto que as baterias são utilizadas para suprir picos de fornecimento de energia, como por exemplo durante manobras em porto.



As modificações realizadas no navio existente podem ser divididas da seguinte forma:

- Sistema de armazenamento e distribuição de combustível
- Instalação de células de combustível
- Melhoria do sistema elétrico
- Instalação de sistemas auxiliares

Para a instalação do sistema de armazenamento e distribuição de combustível, foram escolhidos dois tanques de hidrogénio liquefeito de 50m<sup>3</sup>, baseados na solução MAN Cryo, com uma capacidade total de armazenamento de hidrogénio líquido de 4615 kg. Esses tanques foram instalados a bordo num novo pavimento construído especialmente para este efeito. Tal como na primeira opção, os tanques foram posicionados dentro dos limites estabelecidos pelo código IGF para evitar danos em caso de colisão.

Devido ao hidrogénio ser armazenado na forma líquida a -253°C, existe uma maior probabilidade de fuga de hidrogénio para o espaço do tanque próximo ao nível do convés, em comparação com a primeira opção, onde o hidrogénio é armazenado na forma gasosa e pode escapar facilmente pela atmosfera. Por isso, foi considerado um sistema de ventilação mecânica próximo do nível do convés para a área do espaço do tanque, conforme exigido pelas normas de segurança do código IGF, com o objetivo de minimizar qualquer concentração potencial de hidrogénio ou quaisquer outras fugas na área abaixo da sua faixa de inflamabilidade.

A tubagem de ventilação de hidrogénio, para esse caso específico, foi posicionada próxima dos tanques, enquanto uma estação de abastecimento de hidrogénio e o sistema de purga foram adicionados à instalação, seguindo um padrão semelhante à primeira opção. Além disso, dois permutadores de calor foram incluídos para aquecer o hidrogénio liquefeito de temperaturas criogénicas para a temperatura ambiente, para a utilização nas células de combustível.

As demais modificações limitaram-se aos espaços de máquinas, dentro do caso. A antiga casa de máquinas agora contém a maior parte do equipamento elétrico necessário para o sistema híbrido, incluindo quatro motores elétricos de propulsão, juntamente com um sistema elétrico mais complexo. Além disso, foi ajustado um sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC) para a nova configuração.

No total, 10 células de combustível de hidrogénio PEM foram instaladas em dois compartimentos separados e estanques ao gás, um em cada lado do casco. Esse arranjo fornece uma potência total de 3250 kW no início de sua vida útil, garantindo 2880kW no final da vida útil das células de combustível, o que é suficiente para suprir às necessidades de energia do navio estudado. A disposição em sala dupla oferece redundância, permitindo que o navio continue a operar no caso de uma das células de combustível falhar num dos espaços. O acesso aos compartimentos das células de combustível é possível a partir da antiga casa de máquinas



e do convés principal, ambos com compartimentos de bloqueio para cumprir com os requisitos de segurança do código IGF.

As baterias foram instaladas em espaços dedicados no casco, isoladas com proteção estrutural contra incêndios e ligadas ao circuito elétrico principal. Equipamentos auxiliares e tanques originalmente localizados na antiga sala de células de combustível foram realojados em diferentes compartimentos do navio. O alojamento da tripulação foi mantido, apesar da introdução de células de combustível e baterias.

A tabela 9 apresenta o custo de instalação de células de combustível em um navio catamaran de 85 metros, com potência de 2.9MW, conforme estudo conjunto realizado pelo grupo BMT e pela *PA Consulting Group*. A figura 9, por sua vez, ilustra o custo operacional diário das células de combustível de hidrogénio, variando conforme a rota de produção utilizada.

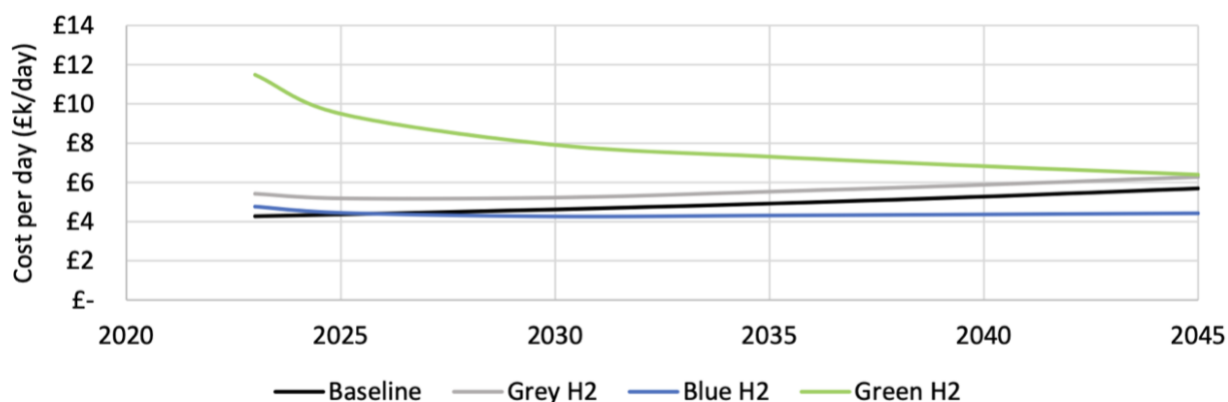


## CAPEX Células de Combustível de Hidrogénio

Item	Valor [mUSD]
Consumo [kg/dia]	1300
Estaleiro	8
Células de combustível de hidrogénio	9.5
Tanques de Armazenamento	5
<b>Total</b>	<b>22.5</b>

**Tabela 9.** CAPEX de Adaptação de um Navio à Célula de Combustível de Hidrogénio

Fonte: Estudo colaborativo entre o BMT group and PA consulting, 2023.

**Figura 9.** Custo Diário da Célula de Combustível de Hidrogénio.

Fonte: Estudo colaborativo entre BMT group e PA consulting, 2023.

Além dos estudos sobre a aplicação do hidrogénio em células de combustível, amplamente documentados na literatura, o amoníaco também surge como uma opção promissora para um futuro de carbono zero.

Desde novembro de 2019, a MAN Energy Solutions tem anunciado iniciativas sobre o desenvolvimento de motores de combustão interna a consumir amoníaco (ICE). Ao longo de 2024 e possivelmente em 2025, a empresa irá realizar diversos testes. No entanto, mesmo com o apoio e a colaboração dos armadores, o CEO da MAN ES, Uwe Lauber, afirmou que a disponibilidade comercial de motores de dois tempos que consomem amoníaco não é esperada antes de 2027. Além do ICE convencional, a tecnologia de células de combustível é projetada como uma das futuras soluções de propulsão devido ao seu potencial e vantagens significativas.

Quando se trata de usar amoníaco como combustível, as células de combustível de carbonato fundido (MCFC) e de óxido sólido (SOFC) destacam-se como sendo as preferidas. Estas células de combustível são de alta temperatura e as mais adequadas para utilização com o amoníaco, pois a sua alta temperatura permite o “*cracking*” do amoníaco no hidrogénio, pois



a SOFC alimentada diretamente com o amoníaco ainda não está disponível e não está prevista num futuro próximo. Além disso, a eficiência do sistema não é tao elevada quanto a do SOFC alimentada com hidrogénio.

A SOFC demonstrou uma eficiência excepcional, disponibilidade, baixo ruído, menor necessidade de manutenção e alta fiabilidade, além de uma durabilidade relativamente longa. Entre todas estas vantagens, o fator chave que influencia sua adoção na indústria marítima é a redução do custo de capital para um nível aceitável e a extensão da sua vida útil num futuro próximo.

A tecnologia mais recente da SOFC é capaz de alcançar uma eficiência do sistema de 60% e uma eficiência total de mais de 90%, quando comparada com 50% e 53% dos motores de combustão interna tradicionais. Além disso, foi alcançado um recorde de tempo de operação contínua de 10 anos dos SOFC. No entanto, a SOFC é sempre integrada num sistema híbrido com outros componentes, como baterias, para lidar com a dinâmica do consumo devido ao seu arranque lento e às variações das necessidades de energia elétrica.

Um estudo de viabilidade de um navio porta-contentores, cujas características estão apresentadas na tabela 10, que aplica tecnologia de células de combustível de óxido sólido integradas com “*cracking*” do amoníaco, publicado no jornal internacional de energia a hidrogénio (*International Journal of Hydrog. Energy*, 2022), explorou a viabilidade do uso de SOFC de amoníaco em comparação com outras tecnologias de propulsão, como motores de combustão interna (ICE) movidos a HFO, LNG ICE e Amoníaco ICE. O estudo analisou dados específicos de um navio porta-contentores para avaliar aspetos importantes, como o investimento inicial, o consumo de combustível, as emissões de poluentes e os custos de propriedade do navio, incluindo os custos operacionais, ao longo de um período de 20 anos.

Ano de Construção	DWT	TEUs	Velocidade de Serviço	Velocidade Max.	Potência do Motor	Capacidade de Armaz. De Comb.
2018	189,766	20,182	21 nós	24.15 nós	56,380 kW	15,142 m <sup>3</sup>

**Tabela 10.** Características Principais do navio Porta - Contentores

Fonte: Wu, S., Miao, B. & Chan, S., 2022. *Feasibility Assessment of a Container Ship Applying Ammonia cracker-integrated solid Oxide Fuel Cell Technology.*

Levando em consideração a eficiência do motor LNG ICE, amoníaco ICE e amoníaco SOFC, bem como o menor poder calorífico do LNG e do amoníaco, estimou-se o consumo anual de combustível. Os valores estimados de energia e o consumo de combustível permitem então a projeção do FuelEX. Ao combinar o CAPEX, o OPEX e os custos de carbono no mercado internacional, é possível prever e comparar os custos acumulados entre diversos tipos de



propulsão, as perspetivas de cada um serão afetadas por alterações futuras nos regulamentos e pela implementação de metas mais rigorosas.

A viabilidade económica do SOFC do amoníaco foi examinada considerando o CAPEX, o OPEX (excluindo os gastos com combustível), o FuelEX (despesas com combustível) e o custo do combustível incorrido no âmbito do RCLE-EU e um preço do carbono baseado no mercado internacional para quatro tipos diferentes de motores. Na análise do CAPEX, apenas foram considerados o sistema de propulsão principal e o sistema de tanque de combustível.

A tabela 11 mostra o custo de capital unitário e total do sistema de propulsão, o volume, o custo de capital unitário e total do tanque de combustível e o CAPEX para cada tipo de motor. A tabela 12 representa o OPEX anual (incluindo apenas os custos de operação e manutenção) para os quatro tipos de motor.



Item	HFO ICE	LNG ICE	ICE alimentado com Amoníaco	SOFC com Amoníaco
Custo sistema de Propulsão [USD/kW]	600.00	870.00	870.00	900.00
Custo de um sistema de propulsão de 56,380 kW [USD]	33,828,000.00	49,050,600.00	49,050,600.00	50,742,000.00
Dimensão do Tanque de Comb. [m <sup>3</sup> ]	15,142	19,262	32,760	32,760
Custo do Tanque de Comb. [USD]	883.00	2,120.00	603.00	603.00
Custo Total do Sistema de Armaz. de Comb. [USD]	3,371,599.00	40,843,203.00	19,762,840.00	19,762,840.00
<b>CAPEX total [USD]</b>	<b>47,199,599.00</b>	<b>89,893,803.00</b>	<b>68,813,440.00</b>	<b>70,504,840.00</b>

**Tabela 11.** CAPEX do navio porta-contentor (Sistema de Propulsão & Tanques de Armazenamento).

Fonte: Wu, S., Miao, B. & Chan, S., 2022. *Feasibility Assessment of a Container Ship Applying Ammonia cracker-integrated solid Oxide Fuel Cell Technology.*

Item	Custos da Unidade em Operação [USD/MWh]	Custos de Operação ao Ano [USD]
HFO ICE	5	1,559,000.00
LNG ICE	9	2,647,000.00
ICE alimentado com Amoníaco	9	2,806,000.00
SOFC com Amoníaco	11	2,858,000.00

**Tabela 12.** OPEX para cada tipo de Propulsão.

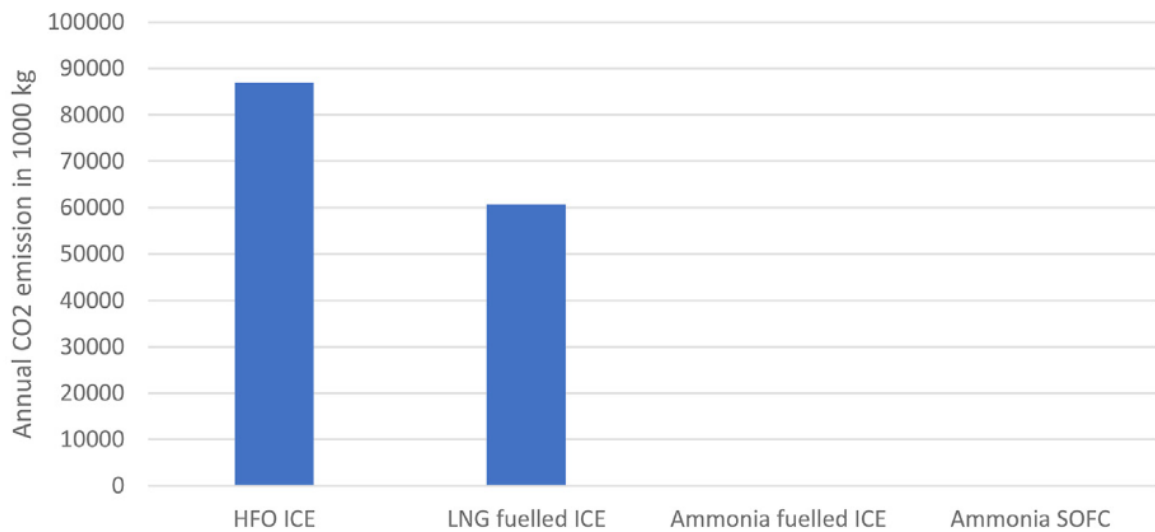
Fonte: Wu, S., Miao, B. & Chan, S., 2022. *Feasibility Assessment of a Container Ship Applying Ammonia cracker-integrated solid Oxide Fuel Cell Technology.*



### Emissões

Relativamente ao aspeto ambiental, as células de combustível apresentam uma capacidade significativa de redução da emissão de gases de efeito de estufa, incluindo dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), partículas (PM) e metano (CH<sub>4</sub>). Esta tecnologia transforma hidrogénio e oxigénio em eletricidade, emitindo apenas vapor de água como subproduto no caso das células de combustível de hidrogénio, ou geram eletricidade por meio de reações eletroquímicas, no caso das células de combustível de amoníaco, eliminando assim as emissões de CO<sub>2</sub> diretamente associadas à queima de combustíveis fósseis.

Ainda sobre o estudo apresentado anteriormente, na figura 10 apresentam-se os dados de emissões anuais de CO<sub>2</sub> associada a cada tipo de emissão analisada.



**Figura 10.** Emissões de Carbono para cada Tipo de Propulsão.

Fonte: Wu, S., Miao, B. & Chan, S., 2022. *Feasibility Assessment of a Container Ship Applying Ammonia cracker-integrated solid Oxide Fuel Cell Technology.*

Os benefícios dos sistemas de células de combustível para aplicações marítimas vão além do aspeto ambiental. Segundo Hiraiwa, membro do Yanmar Power Technology Co. Ltd, a ausência de óleo combustível faz com que o sistema seja inodoro, o que representa uma vantagem significativa para os navios, uma vez que o odor do combustível marítimo é frequentemente apontado como uma das causas do enjoo em navios de passageiros. Além disso, a ausência de um motor convencional reduz significativamente as vibrações e o ruído, proporcionando assim um maior conforto para os passageiros.

### Outras Considerações

A comercialização de células de combustível ainda enfrenta algumas barreiras significativas, principalmente as relacionadas com os custos. Entre essas barreiras, estão o elevado preço da platina e outros catalisadores, problemas de controlo térmico, requisitos rigorosos de processamento de combustível e a complexidade do sistema. Além disso, há desafios



específicos, como o tempo de arranque nas células de combustível de ácido fosfórico, o elevado custo dos reformadores, especialmente em sistemas de pequena dimensão e a baixa densidade de potência volumétrica. Outros obstáculos incluem a intolerância ao monóxido de carbono dos elétrodos, o elevado custo das membranas para as células de combustível de eletrólitos de polímeros sólidos, a baixa eficiência do elétrodo de oxigénio e a deterioração de sistemas auxiliares, que exige a substituição periódica das células.

A vida útil esperada dos motores de combustão interna é de pelo menos 20 anos, enquanto que a unidade de células de combustível de óxido sólido, por exemplo, já demonstrou mais de 10 anos de vida útil comprovada. Para o SFC de amoníaco, prevê-se uma vida útil de 5 anos, com uma taxa de aumento de 25% ao longo deste período e uma taxa de custo reduzida de 42% para cada substituição. As células de combustível de hidrogénio destacam-se pela fiabilidade e uma vida útil mais longa em comparação com a dos motores convencionais. Isto resulta numa menor necessidade de manutenção e um risco reduzido de avarias, minimizando o tempo de inatividade e aumentando o tempo de serviço do navio.

Além disso, as células de combustível de hidrogénio são uma alternativa mais leve e eficiente em termos de espaço, quando comparadas com os motores Diesel tradicionais, o que as torna particularmente atrativas para navios mais pequenos ou com espaço limitado de armazenamento de energia. As células representam uma potencial revolução no setor marítimo, proporcionando um substituto limpo, eficiente e sustentável dos combustíveis fósseis convencionais. No entanto, a sua integração em aplicações marítimas enfrenta desafios significativos, como questões de segurança, prontidão de infraestrutura e complexidade regulatória, que precisam de ser ultrapassadas para que a viabilidade e aceitação desta tecnologia sejam alcançadas.

### 3.5. LNG

A perceção da magnitude do desafio da descarbonização começou a tornar-se mais evidente para muitos na indústria marítima em 2024. A partir de um de janeiro deste ano, restam apenas 312 meses – equivalente a 1.356 semanas ou seja 9.497 dias – até 2050, quando o transporte marítimo deve atingir a meta de zero emissão de emissões de carbono. Regulamentos como o CII da IMO (em vigor desde 2023), a inclusão do transporte marítimo no RCLE-EU e o *FuelEU Maritime* (previsto para 2025) estão criando uma pressão crescente e imediata, além de custos adicionais para os armadores e operadores de navios sobre as emissões de gases de efeito de estufa. Encontrar formas de alcançar esses objetivos em 312 meses é um desafio que a indústria precisa de enfrentar de forma coordenada e concertada, procurando soluções práticas, realistas e seguras.

O esforço de 15 anos para reduzir as emissões de gases poluentes atmosféricos criou uma oportunidade para os combustíveis fósseis, que são mais limpos do que o HFO histórico. As alternativas atuais incluem LNG, gás de petróleo liquefeito (LPG), óleo combustível pesado com baixo teor de enxofre (LSHFO) e o gásóleo marítimo (MDO), cada um com diferentes vantagens e desvantagens, diferentes implicações sobre especificações, custo e operação de



máquinas a bordo e preços diferentes e disponibilidades. Por exemplo, continua a ser difícil reduzir as emissões de PM de LSHFO ou MDO, mesmo que as tecnologias de redução de emissões atualmente disponíveis estejam a ser plenamente aplicadas (Lehtoranta et al., 2019).

A eficiência energética emerge como uma estratégia crucial para a conformidade a curto prazo. Em junho de 2023, a Clarkson estimou que mais de 6.250 navios já estavam equipados com tecnologias de economia de energia, representando 27,3% da tonelagem total da frota mundial. Embora essas inovações apontem na direção certa, alcançar a neutralidade líquida requer avanços em direção aos combustíveis neutros de forma realista e prática. O LNG mantém assim uma posição destacada na lista de pedidos de novas construções movidas a combustíveis alternativos. Além disso, o metanol é o único outro combustível alternativo com um número significativo de pedidos comerciais. No primeiro semestre de 2023, as encomendas de navios a LNG permaneceram robustas. Houve um aumento nos pedidos de navios porta-contentores movidos a metanol a meio do ano, seguido por um forte aumento de pedidos de navios a consumir LNG no último trimestre. A decisão da CMA-CGM em novembro de converter a sua encomenda de oito navios contentores de 9.200 TEUs com duplo combustível de metanol para duplo combustível movidos a LNG é um marco significativo (DNV, 2023).

De acordo com a DNV, em dezembro de 2023, havia 469 navios movidos a LNG – excluindo navios de transporte de LNG – em operação, com mais 537 navios encomendados. A DNV prevê que, até ao final de 2027, mais de 1000 navios movidos a LNG irão transportar mercadorias em todo o mundo com emissões reduzidas. Este valor contrasta com apenas 36 navios movidos a LNG em operação há uma década atrás (DNV, 2023).

Há uma crescente conscientização de que todos os combustíveis alternativos atualmente em análise seguem uma trajetória semelhante: dos combustíveis fósseis aos bio derivados (ou combustíveis azuis produzidos através da captura e armazenamento de carbono) e, eventualmente, aos combustíveis produzidos a partir de eletricidade renovável. Além disso, há o reconhecimento de que, atualmente, todos esses combustíveis são considerados fósseis, ou seja, “cinzentos”.

A utilização de metanol, amoníaco e hidrogénio “cinzentos” como combustíveis marítimos resultaria em mais emissões de gases de efeito de estufa do que os combustíveis marítimos tradicionais que eles pretendem substituir, se considerarmos a produção “*well to wake*”, como é usual designar-se. Isto significa que estas soluções não são viáveis para a descarbonização, mesmo a curto prazo (Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping, 2024). Por outro lado, o LNG “cinzento” oferece uma redução imediata de emissões de gases de efeito de estufa até 23% depois de consideradas as perdas de metano, nos motores a dois tempos instalados em navios que transportam a maior parte de carga a nível mundial. Por conseguinte, o metanol, amoníaco e hidrogénio utilizados no transporte marítimo necessitam de ser “verdes” para alcançar a paridade com o VLSFO (*Very Low Sulphur Fuel Oil*) e cumprir os regulamentos como o *FuelEU Maritime*.



O LNG emerge como uma solução prática, realista e viável para a descarbonização na indústria marítima, alinhando-se com os principais objetivos estabelecidos. Uma vantagem adicional é a capacidade dos navios LNG construídos atualmente de utilizar bio-LNG e e-LNG, gerando zero emissões líquidas de carbono provenientes de eletricidade renovável, uma opção promissora para o futuro (DNV, 2023).

O LNG está disponível de forma abundante como matéria-prima, enquanto a disponibilidade de bio-LNG está em ascensão. O e-LNG ainda enfrenta desafios semelhantes em termos de disponibilidade e custos, comparáveis aos de outras fontes de energia renovável baseadas em hidrogénio (Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping, 2024).

No entanto, apesar do otimismo e do aumento global das encomendas de navios movidos a LNG, persiste a controvérsia sobre se o benefício teórico do LNG em termos de emissões de gases de efeito de estufa (GEE) pode ser totalmente realizado na prática. O LNG é essencialmente metano liquefeito e o próprio metano é um GEE muito mais potente do que o CO<sub>2</sub> num horizonte temporal de 20 anos. Estas características podem anular os benefícios climáticos teóricos da queima de LNG e, em alguns casos, resultar em emissões totais de GEE mais elevadas do que o uso de combustíveis tradicionais à bases de petróleo (Howarth & Jacobson, 2021).

A fuga de metano não queimado para a atmosfera, conhecida por deslizamento de metano (*methane slip*) pode ocorrer em várias etapas do ciclo de vida do combustível, desde a extração até a combustão nos motores de navios. As estimativas sobre estas fugas variam de uma forma ampla e a incerteza sobre o impacto líquido nas emissões de LNG nas emissões de GEE tem gerado considerável debate no setor marítimo.

Apesar destas incertezas, a utilização de LNG oferece benefícios imediatos para a qualidade do ar e conformidade com os regulamentos de enxofre, resultando em reduções significativas de emissões de SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e partículas. A eficiência relativa em termos de carbono do LNG também o torna uma opção atrativa, especialmente à luz das regulamentações destinadas a reduzir as emissões de GEE dos navios (DNV, 2023).

#### *Viabilidade Financeira*

Para navios que operam total ou parcialmente em áreas de controlo de emissões (ECAs), a conversão para motores a LNG com duplo combustível oferece uma oportunidade para cumprir as normas nas ECAs e reduzir em simultâneo os custos operacionais. Embora a adaptação para a conversão para LNG tenham um custo inicial elevado, o LNG é atualmente mais barato do que os combustíveis com baixo teor de enxofre em várias regiões. Portanto, o fator mais determinante para a viabilidade económica de uma conversão é a diferença de preço entre o combustível com baixo teor de enxofre e o LNG, já que estes valores apresentam variações regionais significativas, com os preços nos Estados Unidos a serem os mais baixos, seguido pelos europeus e, por fim, os asiáticos, o que resulta em economias variáveis dependendo da localização.



Existem dois tipos distintos de motores: os motores bicompostíveis, que podem operar tanto com LNG quanto com combustível convencional e os motores mono-compostíveis de combustão, que utilizam exclusivamente o LNG. Os motores bicompostíveis possibilitam que os navios funcionem predominantemente com LNG, mantendo a flexibilidade de alternar para combustíveis convencionais quando tal seja necessário.

Uma pesquisa recente realizada pela SEA-LNG fornece informações valiosas sobre a adaptação de um navio de 300 000 DWT do tipo *Very Large Crude Carrier* (VLCC) que faz viagens do Golfo Pérsico para a China. O CAPEX em USD por tonelada de porte bruto para as alternativas de combustíveis é detalhado na tabela 13.

No que diz respeito ao CAPEX, este compreende dois componentes principais: os custos de investimento ou capital para transporte, incluindo tanques de LNG e os custos de investimento para a construção de terminais de recepção, que abrangem a construção do cais, equipamentos de armazenamento de LNG, unidades de regaseificação e o sistema de tubagens para a central de energia.

Item	Unidade	Valor (\$)
Conversão (LNG Pac)	USD/Motor	1,753,800.00
Tanques LNG (ISO) e frete	USD/Tanques ISO	136,000.00
Estaleiro	USD	138,889.00
<b>Total</b>	<b>USD</b>	<b>2,028,689.00</b>

**Tabela 13.** CAPEX de Conversão de um Motor Bicompostível para LNG.

Fonte: Pratiwi et al., 2022 on the 3<sup>rd</sup> Maritime Safety International Conference (MASTIC).

O custo de capital contempla dois cenários de investimento: o primeiro cenário contempla uma nova construção, enquanto o segundo envolve a conversão de um navio existente. De acordo com a estimativa de custo de capital para o navio existente, verifica-se que os custos para navios existentes não convencionais são de US\$ 5.601.342 para nova construção e US\$ 4.726.001 para a conversão, conforme apresentado na tabela 14. Esta estimativa inclui materiais, construção e aquisição de tanques ISO de LNG de 20 pés, bem como os custos de conversão e modificação do motor para um motor de duplo combustível, incluindo o reforço da construção no convés, aquisição do motor e custos de estaleiro. O custo dos tanques ISO de LNG de 20 pés foi de aproximadamente US\$ 68.000 por tanque, incluindo o transporte, que no caso foi da China para Indonésia (Pratiwi et al., 2022).

Item	Preço (\$)
Nova Construção	5,601,342.00
Conversão	4,726,001.00

**Tabela 14.** Cálculo do CAPEX para Nova Construção e para a Conversão de um Navio para LNG.

Fonte: Pratiwi et al., 2022 on the 3<sup>rd</sup> Maritime Safety International Conference (MASTIC).



Além disso, é necessário calcular o custo de investimento em infraestruturas e equipamentos no terminal e na central de energia. Os componentes e equipamentos da infraestrutura devem ser ajustados para cumprir os requisitos e especificações de cada central, conforme o projeto de distribuição de LNG em cada rota. Os preços unitários para cada componente de custo são obtidos de informações fornecidas por diversos fornecedores e relatórios de estudos anteriores. Os custos de investimento para os navios e para o terminal de receção estão indicados na tabela 15.

Motor N°	Referência	Preço (\$)	Potência do Motor [kW]	Preço [USD/kW]
1	Fabricante	4,424,000.00	2800	1.580
2	Fabricante	8,836,000.00	15492	570
3	Estudo anterior por Prastyasary et al., 2019.			693

**Tabela 15.** Custo Estimado de Conversão de um Motor Bicomcombustível para LNG.

Fonte: Pratiwi et al., 2022 on the 3<sup>rd</sup> Maritime Safety International Conference (MASTIC).

As despesas operacionais (OPEX) abrangem todos os custos incorridos durante a operação anual dos navios e dos terminais de receção de LNG, incluindo os custos de manutenção e são apresentados na tabela 12, juntamente com outros tipos de sistemas de propulsão.

Outros exemplos de estudos de viabilidade são apresentados na tabela 32, 33 e 34, na subsecção 6.7 sobre a análise de viabilidade do caso de estudo. Nessa análise, compara-se a viabilidade de instalação de torres de lavagem com a adaptação de navios para propulsão por LNG por meio do alongamento do casco, que consiste na adição de uma seção pré-fabricada ao navio, contendo os tanques LNG e todos os sistemas auxiliares necessários.

### *Emissões*

Uma avaliação do ciclo de vida do LNG aplicado a navios revelou as vantagens comparativas desse combustível. Comparando-se um navio porta-contentores com um navio ferry de passageiros operando entre a China continental e Taiwan, foram considerados cenários utilizando HFO e LNG. O estudo indicou uma possível melhoria nas emissões totais de gases de efeito de estufa com a utilização de LNG, obtendo-se uma redução das emissões de NOx em 38-39% e CO em 42-43%. Reduções significativas foram também observadas nas emissões de SO<sub>2</sub> (99.8%) e PM (97.5%), enquanto as emissões de metano aumentaram substancialmente com o uso de LNG (*Transp. Research Part D*, 2017).

Embora haja consenso sobre os benefícios do LNG na redução de poluentes atmosféricos, o seu impacto nas emissões de gases de efeito de estufa permanece controverso. O LNG possui até 30% menos carbono por unidade de energia química em comparação com os combustíveis fósseis, mas as incertezas em torno das emissões ao longo do seu ciclo de vida são consideráveis. O metano, principal componente do LNG, é um GEE potente quando libertado



sem combustão na atmosfera. Portanto, qualquer fuga de LNG deve ser considerada na avaliação do impacto total deste combustível na atmosfera.

A potência do metano como gás de efeito de estufa depende do período considerado. Com uma vida atmosférica relativamente curta, o metano tem um potencial de aquecimento global de cerca de 2.5 vezes mais elevado quando medido numa base de 20 anos quando comparado com um horizonte temporal de 100 anos. Ao longo de 20 anos, o metano é 86 vezes mais potente que o CO<sub>2</sub> equivalente e, em 100 anos, é 36 vezes mais potente (IPCC, 2013). No contexto da introdução de navios novos alimentados a LNG e da adaptação ao mercado para cumprir as metas da IMO de redução das emissões de GEE até 2050, o efeito de aquecimento a curto prazo (20 anos) do metano é tão relevante quanto sua influência a longo prazo (100 anos) (Appl. Sci., 2023).

Um estudo sobre os aspetos ambientais e económicos dos combustíveis marítimos alternativos indica que o LNG possui o Valor Atual Líquido (VAL) mais elevado entre os combustíveis analisados para os navios que mais frequentemente fizeram escalas em portos irlandeses em 2019, seguido pelo metanol e pelo hidrogénio verde. Embora o hidrogénio verde seja a melhor opção para a descarbonização, é necessário que se verifique uma redução significativa no preço deste combustível para que possa competir em termos de custos com o LNG e o metanol.

Em resumo, o LNG é a principal alternativa ao gasóleo marítimo e ao óleo pesado (MGO e HFO, respetivamente), proporcionando uma redução significativa de CO<sub>2</sub> e cumprindo as regulamentações de emissões, resultando numa redução global de 8 a 20% em comparação com o HFO e o MGO. Esta conclusão é confirmada pelo aumento no número de navios remodelados e novos que utilizam LNG como combustível (Transp. Research, 2022).

### *Outras Considerações*

A utilização do LNG como combustível marítimo apresenta inúmeras vantagens em termos de redução de poluentes atmosféricos quando comparado com os combustíveis tradicionais. Contudo, é essencial considerar o deslizamento de metano (*methane slip*) associado à sua utilização.

O deslizamento de metano na queima do combustível LNG refere-se à libertação não intencional de metano durante o processo de armazenamento, manuseamento ou queima do LNG, que pode evaporar-se lentamente em condições não controladas, especialmente em sistemas de tanques e durante o fornecimento de gás ao motor. Estas emissões de metano podem reduzir os benefícios ambientais esperados do uso do LNG, dado que o metano é um potente gás de efeito de estufa, exigindo procedimentos rigorosos de controlo e monitorização para minimizar o seu impacto na pegada de carbono do transporte marítimo.





#### 4. OUTRAS MEDIDAS PARA A SUSTENTABILIDADE DO TRANSPORTE MARÍTIMO

A eliminação das emissões de gases de efeito de estufa é uma prioridade indiscutível a nível global, com destaque especial para o transporte marítimo, considerado um setor fundamental para alcançar a neutralidade das emissões. Nos capítulos anteriores, foram apresentados os combustíveis mais promissores para a utilização em navios, com o objetivo de acelerar o processo de descarbonização. Contudo, apesar do significativo potencial da indústria marítima para reduzir as emissões e cumprir os requisitos regulatórios por meio da alteração do combustível, as incertezas que ainda existem sobre o uso de biocombustíveis indicam que é necessário implementar em simultâneo medidas de eficiência energética, como sejam a melhoria técnica de equipamentos, projetos tecnológicos bem como em ações operacionais e organizacionais.

Nesse contexto, a utilização plena das ferramentas digitais é essencial para promover a eficiência energética e alcançar os objetivos estabelecidos até 2050. Segundo a sociedade classificadora DNV, tecnologias eficientes do ponto de vista energético têm o potencial de proporcionar até 15% de redução necessária de emissões de gases de efeito de estufa até 2050. Portanto, é crucial combinar a alteração do combustível com o aproveitamento das inovações tecnológicas para obter ganhos significativos nesse sentido.

A digitalização e a descarbonização são forças complementares e transformadoras no transporte marítimo. A digitalização permite não apenas, mas também impulsionar a descarbonização ao possibilitar uma série de ferramentas e soluções voltadas para a otimização do desempenho ambiental. A integração de tecnologias como “*blockchain*”, aprendizagem automática (*machine learning*), inteligência artificial (*AI*), Internet das coisas (*IoT*) e plataformas de otimização de desempenho cria um ecossistema digital que contribui para a redução das emissões.

A título de exemplo, a utilização de programas de gestão e otimização de rotas de navios permite simular e prever operações úteis, bem como a conceção de sistemas, garantia de serviços, testes baseados em simuladores e previsões. Essas ferramentas também são fundamentais para planear rotas com base em dados meteorológicos, previsão de consumos de combustível e melhoria do desempenho de componentes importantes dos navios, como sejam o casco, hélice e motor.

No entanto, é importante salientar que a implementação dessas tecnologias deve considerar uma perspetiva de ciclo de vida completo e evitar o deslizamento de carbono. O aumento do uso de inteligência artificial, por exemplo, levanta preocupações sobre o impacto ambiental dos servidores necessários para alimentar estes sistemas. Estimativas indicam que os modelos de linguagem de IA e centros de dados são já responsáveis por uma parcela significativa das emissões globais de carbono.



Em resumo, as medidas tecnológicas disponíveis oferecem oportunidades tangíveis para reduzir as emissões de gases de efeito de estufa no transporte marítimo. No entanto, é essencial garantir que estas soluções sejam implementadas de modo eficaz e sustentável, levando em consideração não apenas os benefícios imediatos, mas também os impactos a longo prazo e a necessidade de uma abordagem abrangente para a descarbonização.

## 4.1. Medidas Operacionais

### 4.1.1. Redução de Velocidade

De acordo com o *Concawe Review*, vol. 29, pág. 52, a velocidade dos navios exerce um impacto significativo nos ganhos e nos custos dos operadores marítimos. A relação cúbica entre a velocidade e o consumo de combustível é um fator crucial para determinar a velocidade ótima de um navio. Reduzir a velocidade em 10% resulta numa diminuição de 27% no consumo de energia e uma redução de 19% no consumo de combustível por unidade de distância percorrida (*ConCawe Review*, 2021).

A redução da velocidade também implica numa diminuição da produtividade, já que cada navio entregará menos toneladas de milhas num determinado período, exigindo mais navios para manter o fornecimento total considerado. Apesar disso, muitos operadores têm implementado reduções de velocidade dos navios para reduzir o consumo de combustível, as emissões e os custos. Essas reduções são particularmente eficazes quando os tempos de espera nos portos são convertidos em velocidades de cruzeiro mais lentas (chegadas “*just in time*”) e a capacidade de carga dos navios é maximizada (*ConCawe Review*, 2021).

Além disso, estudos indicam uma melhoria esperada na eficiência do combustível nos próximos anos, atribuída tanto a avanços tecnológicos quanto a reduções na velocidade dos navios. Projetos de navios sem lastro e navios híbridos com emissões baixas ou nulas estão sendo desenvolvidos, utilizando materiais leves e fontes de energia alternativas.

Por outro lado, observa-se um aumento na dimensão dos navios, impulsionado pela economia dos transportes, especialmente em navios porta-contentores e de transporte de minério. O crescimento da dimensão dos navios, juntamente com a expansão do canal do Panamá e o surgimento de mega-alianças pode resultar numa melhor utilização da capacidade da frota mercante mundial.

A digitalização também desempenha um papel fundamental na redução de transporte marítimo e na melhoria da eficiência energética. Tecnologias digitais como análise avançada de dados, automação de processos e logística otimizada contribuem para a melhoria das operações e das rotas, reduzindo assim os custos com o combustível. A digitalização pode abrir espaço para novos modelos de negócio e operações mais eficientes, incluindo o potencial de navios autónomos, que poderiam operar a velocidades mais baixas sem incorrer em custos elevados com a tripulação.



#### 4.1.2. *Otimização de Rotas*

A otimização de rotas é uma estratégia crucial para potenciar a descarbonização da indústria marítima até 2050. Através da utilização de tecnologias avançadas de navegação e análise de dados meteorológicos, as empresas podem identificar rotas mais eficientes em termos energéticos, reduzindo assim o consumo de combustível e as emissões de gases de efeito de estufa. Ao evitar áreas com condições climáticas desfavoráveis e aproveitar correntes marítimas favoráveis, os navios podem percorrer distâncias mais longas com menores custos, contribuindo para uma operação mais sustentável.

Além disso, a otimização de rotas pode resultar em benefícios económicos significativos para os armadores. Reduzindo o tempo de viagem e o consumo de combustível, as empresas podem economizar os custos operacionais, aumentando assim a sua competitividade no mercado. Esta economia de recursos não apenas melhora a rentabilidade das operações, como também incentiva a adoção de práticas mais sustentáveis, alinhando os interesses comerciais com as metas ambientais.

À medida que a tecnologia de otimização de rotas continua a desenvolver-se, espera-se que as suas capacidades se aperfeiçoem ainda mais, oferecendo aos armadores ferramentas mais sofisticadas para reduzir a sua pegada de carbono. Com a implementação generalizada destas soluções, a indústria marítima estará mais bem equipada para enfrentar os desafios da descarbonização e cumprir as metas de sustentabilidade até 2050.

#### 4.1.3. *Conversores de Frequência Variável*

A instalação de variadores de frequência (VFD's) representa uma medida significativa para potenciar a descarbonização da indústria marítima até 2050. Esses dispositivos são capazes de controlar a velocidade dos motores elétricos, otimizando o consumo de energia de acordo com a necessidade operacional. Ao permitir que os motores funcionem com velocidades variáveis, os VFD's reduzem o desperdício de energia associado ao funcionamento contínuo em velocidade fixa. Isso não apenas resulta numa utilização mais eficiente da energia, como também contribui para reduzir as emissões de gases de efeito de estufa ao longo do ciclo de vida dos navios.

Além disso, a implementação de VFD's pode trazer benefícios adicionais, como sejam a redução dos custos operacionais e de manutenção. Com motores funcionando de forma mais eficiente, há uma diminuição no desgaste mecânico, prolongando a vida útil dos equipamentos e reduzindo a necessidade de reparações frequentes. Esta economia de custos não apenas melhora a rentabilidade das operações marítimas, como também contribui para uma maior sustentabilidade ao minimizar a substituição de componentes mecânicos.

Ao promover a eficiência energética e reduzir as emissões de gases de efeito de estufa, estes dispositivos desempenham um papel fundamental na transição para um transporte marítimo mais sustentável e ecologicamente consciente.



#### 4.1.4. Projeto do navio

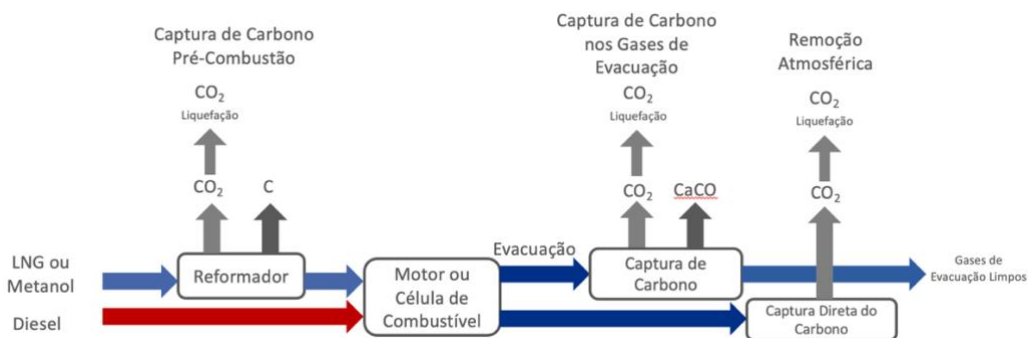
Desde a década de 1980, a eficiência dos novos navios tem melhorado significativamente, impulsionada principalmente pelo custo do combustível e pelas taxas de frete (CE Delft, 2016). No entanto, ainda há medidas de concepção de navios que apresentam um potencial maior de redução das emissões de gases de efeito de estufa, através da redução da resistência dos navios e do consumo de combustível. Essas medidas não se limitam à otimização na fase de concepção e construção de navios novos; O potencial de redução das emissões de gases de efeito de estufa de cada uma destas medidas, juntamente com os custos associados por navio e os respetivos níveis de maturidade tecnológica foram resumidos anteriormente na figura 2. A grande maioria dessas medidas é considerada tecnologicamente madura e já foi amplamente implementada, com uma elevada penetração no mercado, conforme confirmado pelas partes interessadas. No entanto, destacam que o impacto adicional dessas medidas na redução das emissões depende do projeto do navio existente. As estimativas de custos apresentadas no quadro X baseiam-se em informações obtidas com a aplicação da tecnologia até 2020 (*Technological, Operational and Energy Pathways for Maritime Transport to Reduce Emissions Towards 2050*, 2022).

## 4.2. Tecnologias Atualmente Disponíveis

### 4.2.1. Captura e Armazenamento de Carbono

A captura de carbono, que compreende a recolha, transporte e possível armazenamento ou reciclagem das emissões de dióxido de carbono, tem sido considerada uma estratégia eficaz para reduzir as emissões resultantes de processos que geram CO<sub>2</sub>. Embora a maior parte das discussões se concentre em soluções de captura de carbono em terra, recentemente tem-se discutido o potencial dessas tecnologias para reduzir as emissões no transporte marítimo.

O combustível pesado contém até 40% de carbono que pode ser separado por meio de duas abordagens distintas, conforme se ilustra a figura 11.



**Figura 11.** Tecnologias de Captura de Carbono.

Fonte: Adaptado de CCL Corporation, 2024

A captura e armazenamento de carbono a bordo podem ser realizadas antes da combustão, na forma de CO<sub>2</sub> ou possivelmente como carbono puro. Em alternativa, a captura pode ocorrer



após a combustão, na forma líquida ou na sua forma química, uma vez que os gases de evacuação contêm cerca de 5% de CO<sub>2</sub>.

As tecnologias de captura de carbono estão detalhadas na figura 12 e, conforme se pode observar, encontram-se predominantemente em fase de testes, ainda não tendo sido alcançada a maturidade plena para aplicação no setor marítimo.

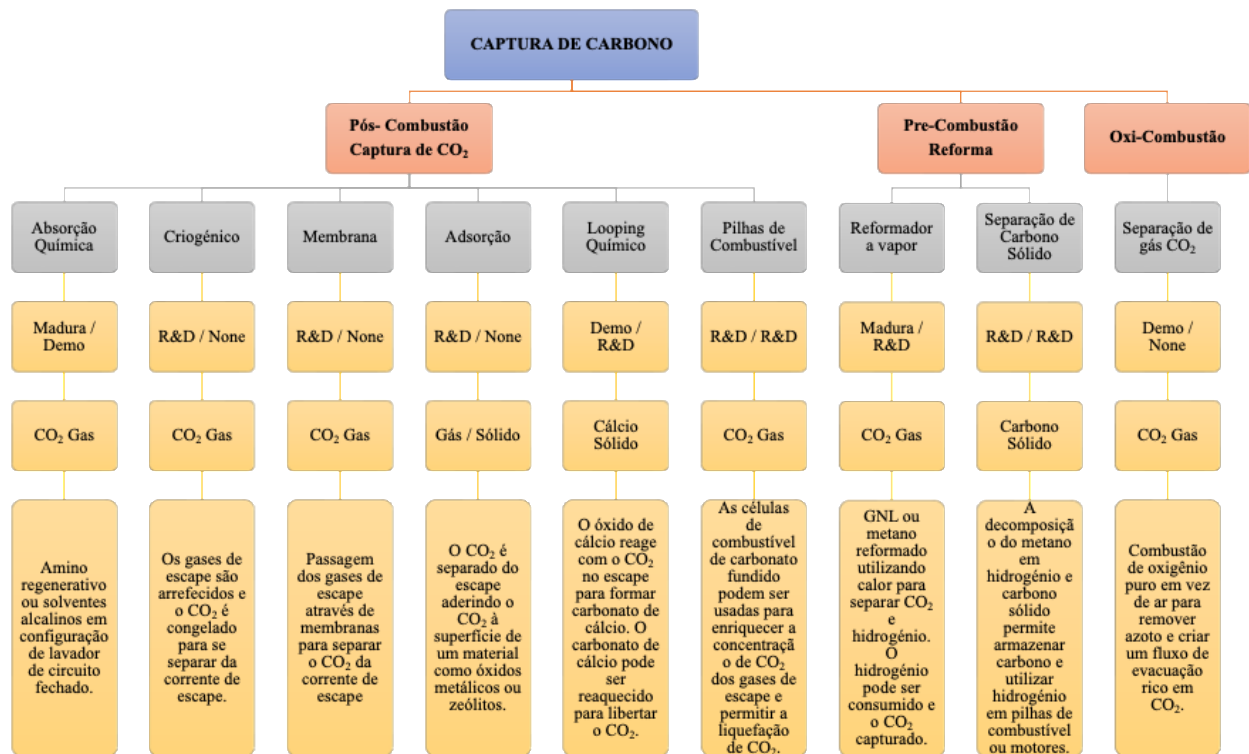


Figura 12. Descrição e Disponibilidade das Tecnologias de Captura de Carbono.

Fonte: Adaptado de CCL Corporation, 2024

A captura e armazenamento de carbono é uma alternativa que deve ser considerada principalmente para navios mais antigos, com uma vida útil remanescente de 15 a 20 anos, e que não serão convertidos para combustíveis sustentáveis tendo em vista a descarbonização.

No entanto, há inúmeros desafios a serem enfrentados com esta tecnologia. O gás natural liquefeito, dentro dos combustíveis fósseis, apresenta menor teor de carbono, enquanto o óleo pesado possui o maior teor, sendo que o volume de CO<sub>2</sub> liquefeito produzido pelo HFO é cerca de três vezes maior do que o próprio volume do HFO.



Adicionalmente, o carbono líquido deve ser armazenado em tanque do tipo C ou “*Bi-lobe*”<sup>23</sup>, o que pode representar um problema para os navios devido à perda de capacidade de carga necessária para instalar estes tanques.

Portanto, a instalação de tanques para o armazenamento de todo o CO<sub>2</sub> emitido representa um desafio considerável, indicando a necessidade de realizar esforços para capturar e armazenar o CO<sub>2</sub> de forma parcial.

O armazenamento na forma de carbono puro ou como carbonato de cálcio pode, no entanto, reduzir a necessidade de grandes espaços de armazenamento, oferecendo uma solução potencial para esse problema. Apresentam-se seguidamente alguns exemplos mais realistas de tecnologias de captura de carbono que usam o método de absorção química.

#### 4.2.1.1. Solvente de Amina

As aminas são compostos químicos derivados do amoníaco (NH<sub>3</sub>), nos quais um ou mais átomos de hidrogénio são substituídos por grupos de alquila ou arila, dois compostos formados, respetivamente, por cadeias de hidrocarbonetos e anéis aromáticos.

O método de captura e armazenamento de carbono que utiliza solvente de amina é um processo químico que separa o dióxido de carbono através de um processo de absorção do CO<sub>2</sub> quando este entra em contacto com uma solução aquosa de amina, resultando numa reação química, que forma compostos de carbamato e bicarbonato, solúveis em água.

De acordo com um estudo interno realizado pela Carnival Corporation, a captura de carbono por meio da absorção química é tecnicamente viável e espera-se que esteja comercialmente disponível até 2030.

Apesar da sua eficácia, com a possibilidade de redução de até 85% nas emissões de CO<sub>2</sub>, a instalação dessa tecnologia resultará num aumento significativo do consumo energético do navio, o que pode levar a um aumento no consumo total de combustível de até 45%.

Um sistema parcial de captura de carbono implica um custo de redução de CO<sub>2</sub> mais elevado do um que sistema completo, uma vez que o CAPEX não considera essa diferença. Um sistema de maior escala é mais eficiente em termos de custos. No entanto, os requisitos de espaço para instalar o equipamento de processamento e armazenamento são significativos, representando um desafio, especialmente em navios de passageiros.

O CAPEX estimado para um sistema que captura de 250 toneladas de CO<sub>2</sub> por dia é de aproximadamente US\$ 40 milhões. O OPEX também deve aumentar devido ao incremento do

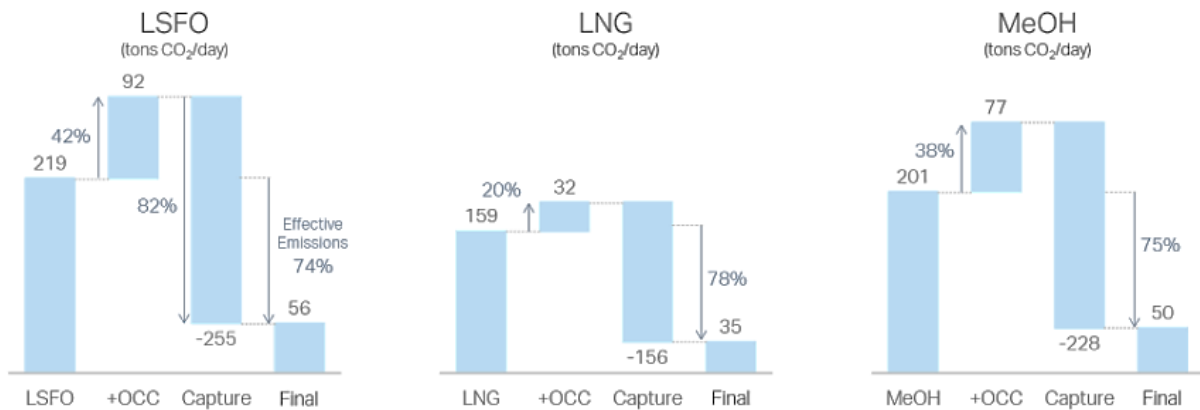
---

<sup>23</sup> Tanques “*Bi-Lobe*” – São tanques utilizados para transporte de gás liquefeito. O termo “*bi-lobe*” refere-se à forma do tanque, que possui duas cavidades ou lóbulos conectados, resultando numa seção transversal que se assemelha a um “8”. Esses tanques são projetados para suportar as condições extremas necessárias para manter o gás no estado liquefeito, a temperaturas muito baixas.



consumo de combustível em mais de 40%. Além disso, o custo estimado para captura e armazenamento de CO<sub>2</sub> é de US\$ 25 por tonelada de CO<sub>2</sub>.

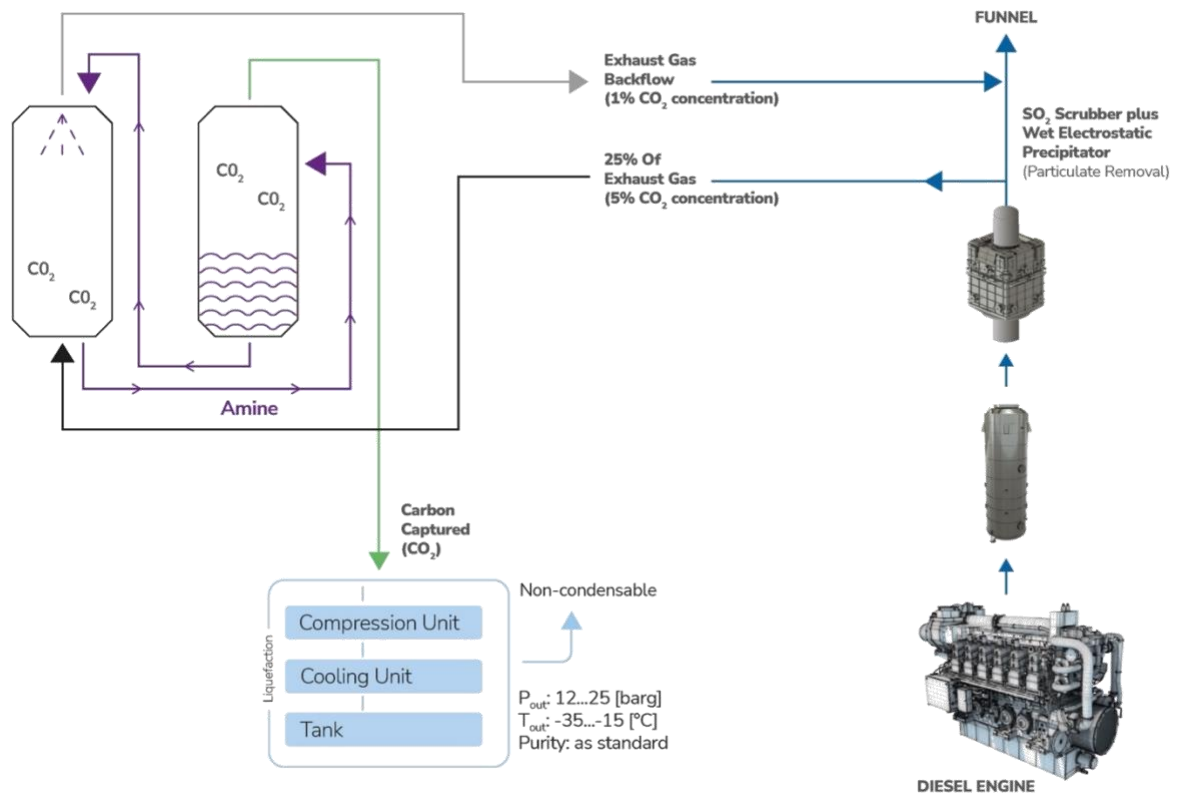
Portanto, estima-se que o custo total da redução do CO<sub>2</sub> varie entre 200 a 300\$ por tonelada de CO<sub>2</sub>, dependendo do tipo do combustível utilizado, conforme representado na figura a seguir.



**Figura 13.** Cálculo da Redução de Carbono.

Fonte: *Green Fuel Optionality Project (GFOP)* at the Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping (MMMCZCS), 2022.

A figura 14 ilustra, para fins de melhor compreensão, o diagrama de uma torre de lavagem equipada com captura química de carbono.



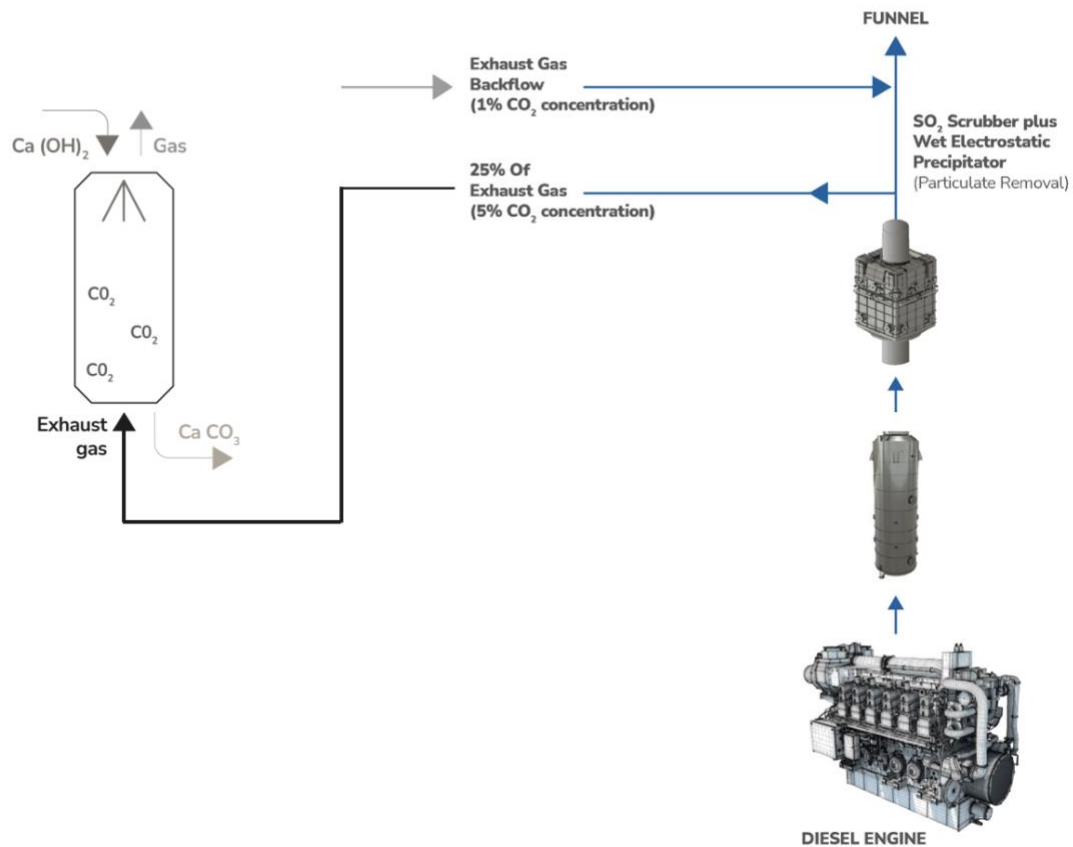
**Figura 14.** Diagrama da Torre de Lavagem com Captura de Carbono Baseado na Absorção Química de Amino.

Fonte: Sítio Digital da Ecospray Technologies

#### 4.2.1.2. Hidróxido de Cálcio

Outra abordagem, que já se encontra em fase final de testes, é a utilização de torres de lavagem com hidróxido de cálcio. O cálcio reage com o dióxido de carbono, formando carbonato de cálcio. A solução de carbonato de cálcio resultante tanto pode ser armazenada a bordo como descarregada no mar. Essa solução mostra-se mais viável devido à possibilidade de eliminação da necessidade de armazenamento a bordo, tornando-a uma opção prática tanto para navios de passageiros como para navios de carga, que assim não precisarão de reduzir a sua capacidade de carga.

A figura a seguir ilustra o diagrama de uma torre de lavagem que utiliza hidróxido de cálcio como meio para a captura do carbono.



**Figura 15.** Esquema de uma Torre de Lavagem com Captura de Carbono por Adsorção de Hidróxido de Cálcio.

Fonte: Sítio Digital da Ecospray Technologies

#### 4.2.1.3. Óxido de Cálcio

Nesta abordagem, o caudal de gases de evacuação é direcionado para pequenos fragmentos de rocha formados por compostos de óxido de cálcio, onde o  $\text{CO}_2$  reage e forma o carbonato de cálcio. Após esse processo, o  $\text{CO}_2$  pode ser extraído novamente do carbonato de cálcio por reaquecimento para reutilização ou armazenamento.

A avaliação do ciclo de vida desse sistema de captura de carbono requer uma análise detalhada, uma vez que o óxido de cálcio é produzido a partir do carbonato de cálcio, um processo que necessita de uma elevada quantidade de energia.

O armazenamento de  $\text{CO}_2$  na forma de carbonato de cálcio pode ser significativamente mais eficiente em termos de volume do que o armazenamento do  $\text{CO}_2$  líquido, embora apresente maior massa.



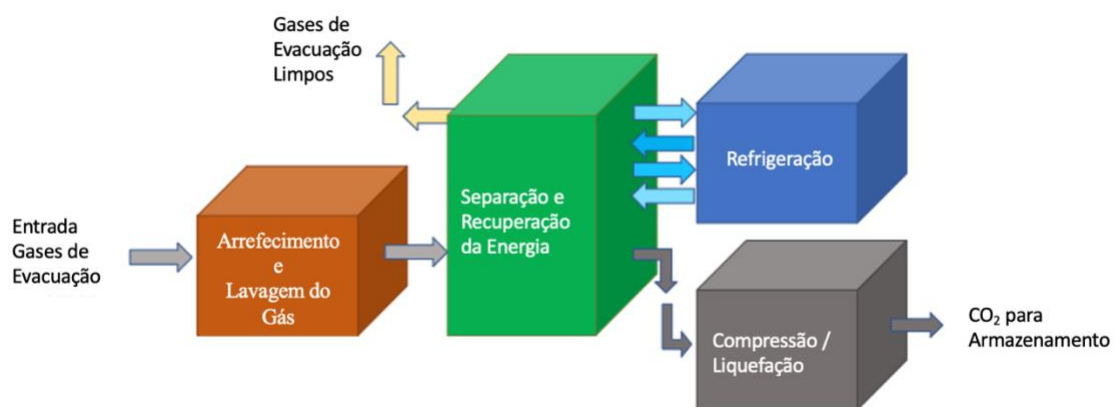
#### 4.2.1.4. Captura de Carbono Criogénica

Nesse método, o dióxido de carbono é removido através de um processo de arrefecimento dos gases de evacuação até  $-150^{\circ}\text{C}$ . Dessa forma o  $\text{CO}_2$  solidifica-se e adere à superfície dos grânulos que passam pelos próprios gases de evacuação arrefecidos. Posteriormente, essas esferas são reaquecidas, fazendo com que o  $\text{CO}_2$  se evapore, permitindo sua captura e liquefação.

Essa abordagem ainda possui um nível de disponibilidade tecnológica baixa, com apenas algumas demonstrações e testes em execução em terra.

Relativamente à aplicabilidade desse método, existem receios quanto à quantidade de energia necessária para arrefecer os gases de evacuação até  $-150^{\circ}\text{C}$ .

O esquema da captura de carbono criogénica está representado na figura 16.



**Figura 16.** Diagrama da Captura de Carbono Criogénica.

Fonte: Elaborado pelo autor

As três opções apresentadas são as mais promissoras para implementação no setor marítimo. A captura de carbono usada em terra já alcançou maturidade tecnológica, porém possui uma significativa pegada de carbono e elevado consumo energético, o que não parece ser atrativo em termos de descarbonização.

Outro facto, é que a maioria das tecnologias de captura de carbono utilizadas em terra não serem viáveis para o setor marítimo, devido a diversos fatores, como o elevado consumo energético e a alta exigência de espaço. Além disso, os requisitos de volume para armazenamento de  $\text{CO}_2$  líquido a bordo são desafiadores, assim como a infraestrutura necessária para descarregar e transportar o  $\text{CO}_2$ .

Portanto, atualmente não existe tecnologia comercialmente disponível e viável para a captura de  $\text{CO}_2$  em grande escala para o setor marítimo.



#### 4.2.2. Torres de Lavagem (Scrubbers)

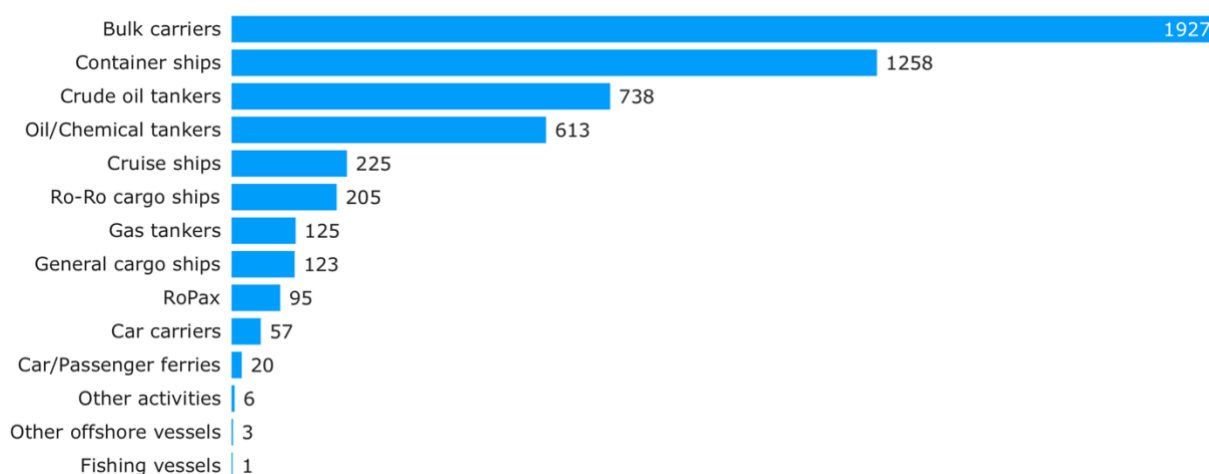
A torre de lavagem é um sistema que garante a remoção de SOx e a diminuição de partículas (PM) nos gases de evacuação. Embora a sua utilização em aplicações terrestres esteja muito avançada, o interesse da indústria marítima na adaptação destas torres em navios aumentou devido à entrada em vigor da norma de redução de enxofre da IMO 2020 (KARATUG, 2022). De acordo com esta regulamentação, as limitações introduzidas pela IMO, correspondentes ao SOx, estão representadas na tabela 16.

Área Global		SECA/ECA	
Data	Enxofre (%)	Data	Enxofre (%)
Início	4.5	Início	1.5
1 de janeiro 2012	3.5	1 de julho 2010	1
1 de janeiro 2020	0.5	1 de janeiro 2015	0.1

**Tabela 16.** Limites de Emissões de Enxofre.

Fonte: IMO, 2005. MARPOL Anexo VI, Regulamento 14.

Segundo dados obtidos pela sociedade classificadora DNV GL, durante a fase de transição, a instalação de torres de lavagem em navios existentes e novas construções foi de 70% e 30%, respetivamente. A figura 17 apresenta a distribuição da instalação das torres de lavagem por tipo de navio, destacando sua aplicação predominante em navios a graneis secos, contentores, petroleiros, navios químicos e Ro-Ro.



**Figura 17.** Número de Torres de Lavagem Instaladas por Tipo de Navio até agosto de 2024.

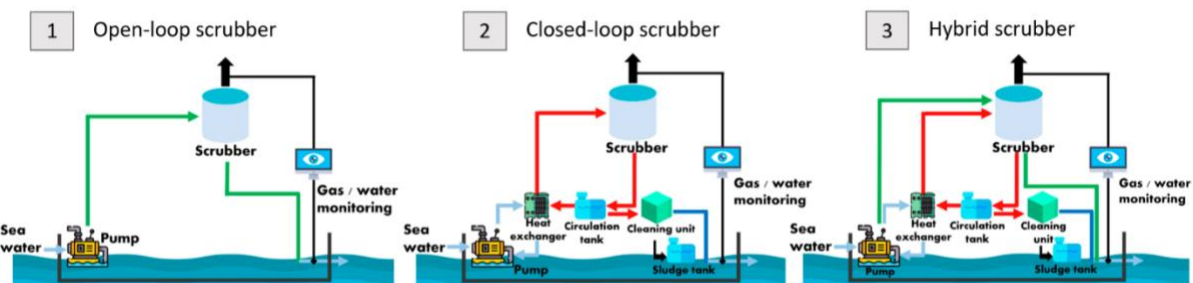
Fonte: DNV, 2024. Veracity Platform.

Existem dois conceitos diferentes de lavagem, o seco e o húmido. O tipo seco de lavador não é o preferido devido ao equipamento pesado, instabilidade e exigência de grandes áreas. O tipo de lavador por via húmida, mais adequado para aplicações em navios, é de três tipos: de circuito aberto, de circuito fechado e híbrido. No sistema de circuito aberto, a eliminação do SOx é



realizada através da alcalinidade natural da água do mar, enquanto que no sistema de circuito fechado, é feita através de produtos químicos alcalinos como hidróxido de sódio (NaOH) ou, raramente por óxido de magnésio (MgO). O sistema de circuito aberto tem algumas vantagens, como menor CAPEX e OPEX, menor exigência de espaço para o sistema e componentes e risco nulo de armazenamento de qualquer produto químico. No entanto, a sua eficiência pode variar de acordo com o nível de alcalinidade da água do mar e o facto da descarga de efluentes de lavadores de circuito aberto ser proibida ou restringida nalgumas áreas costeiras ou portuárias, como o canal de Kiel, na Alemanha, águas territoriais ou portos da Letónia e no Canal do Panamá, por exemplo.

Por outro lado, o funcionamento do sistema de circuito fechado é independente do local de operação do navio e da alcalinidade da água do mar, uma vez que o seu efluente é armazenado a bordo. Assim, o funcionamento do sistema está limitado à capacidade do tanque de resíduos. O tipo de circuito fechado também necessita de mais espaço para adaptação e seu CAPEX e OPEX são relativamente mais elevados. Além disso, esse tipo de torre pode representar riscos adicionais para a tripulação devido aos materiais perigosos que são necessários para a sua operação. A abordagem híbrida, no entanto, neutraliza as desvantagens do projeto de circuito aberto e fechado e fornece flexibilidade significativa na operação de navios, mas tem o OPEX e CAPEX relativamente mais elevados. A conceção e a estrutura dos sistemas de lavagem estão representadas na figura 18.



**Figura 18.** *Opções de Torres de Lavagem*

Fonte: Jee, J., 2022. *Hybrid Multi-Criteria Decision-Making for Marine SOx Scrubber Systems*.

Para uma melhor visualização dos componentes das torres de lavagem, o Anexo II apresenta informações mais detalhadas e técnicas sobre os diferentes tipos torres de lavagem Ecospray e no Anexo IX é apresentado o esquema P&ID correspondente à instalação de uma das torres de lavagem no navio em estudo.

#### 4.2.3. Lubrificação a Ar

O sistema de lubrificação a ar do casco é uma técnica promissora que visa reduzir a resistência de atrito entre o casco do navio e a água, através da criação de uma camada de ar ou de bolhas de ar. Essa estratégia é conhecida por minimizar a resistência do atrito do casco, gerando um tapete de microbolhas na superfície inferior do casco do navio.



A resistência ao atrito, responsável pela maior parte da resistência total de um navio, adquire ainda especial relevância em navios de deslocamento lento, onde pode ultrapassar até 80% da resistência total. Essa resistência é fortemente influenciada pela área de superfície molhada, velocidade de operação e viscosidade do fluido. O princípio fundamental da tecnologia de lubrificação a ar reside na redução da resistência de atrito, através da minimização do contacto direto com a água, ou seja, pela redução da área de superfície molhada através da libertação de bolhas de ar e pela formação de uma camada de ar na superfície inferior do casco.

A redução da resistência do navio provoca uma diminuição na potência exigida ao conjunto propulsor, resultando numa redução de consumo de combustível e, conseqüentemente, em menores custos operacionais. Em condições ideais, os sistemas de injeção de ar têm potencial de redução das emissões de CO<sub>2</sub> entre 10 e 15%, para além de proporcionarem economias consideráveis de combustível. Além disso, esse sistema pode contribuir também para a diminuição das emissões de partículas (PM), óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>) e óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>).

As técnicas de lubrificação a ar podem ser classificadas em três categorias distintas: o conceito de bolhas de ar (BDR<sup>24</sup>), que consiste na injeção de microbolhas de ar na parte inferior do casco; o conceito de filme de ar (ALDR), que cria uma camada contínua de ar na superfície inferior do casco por meio de um aumento do caudal de ar; e o conceito da cavidade de ar (PCDR), que preenche a área embutida sob o casco com ar.

O BDR, ao injetar numerosas microbolhas na camada limite, reduz a densidade local e, conseqüentemente, o número de Reynolds, além de diminuir a viscosidade efetiva. Com o aumento do caudal de ar injetado, ocorre a formação de uma camada contínua de ar, a ALDR, que separa a superfície do casco do caudal da água, o que reduz significativamente a resistência de atrito em comparação com o fluxo borbulhante. Já o PCDR visa reduzir a resistência ao atrito ao injetar ar em num recesso ou cavidade na parte inferior do casco, para separá-lo da água.

Essa tecnologia é aplicável a diversos tipos de navios, incluindo de transporte de LNG, navios RoPax/RoRo, graneleiros, porta-contentores, petroleiros e navios de passageiros.

Num artigo publicado em 2023 pelo *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 15, destaca-se que a eficiência do sistema de lubrificação a ar durante uma viagem de lastro supera a observada numa viagem com o navio carregado. Segundo o artigo previamente mencionado, a análise dos resultados gerais para cada tipo de navio revela que navios com velocidades de operação relativamente baixas, relativamente ao seu tamanho, ou seja com números de Froude baixos, têm um impacto mais significativo na economia de energia, quando comparado com alta velocidade de operação.

---

<sup>24</sup> Bolhas de Ar (BDR): Em inglês *bubble drag reduction* é um dos métodos da lubrificação a ar que consiste na injeção de bolhas na camada limite de modo a reduzir o atrito e melhorar a resistência ao movimento do navio.



A implementação desse sistema requer a instalação de compressores, bombas e tubagens de ar, bem como modificações na forma do casco para reter o ar e criar uma almofada de ar. Dependendo do projeto, é possível que seja necessário proteger os hélices ou adotar outras medidas para evitar que o ar flua em direção aos hélices.

É importante mencionar que menos de 3% da potência total do navio é requerida para operar o sistema de lubrificação a ar e, de acordo com os fornecedores, é capaz de alcançar uma redução de 15% a 40% no arrasto, além de cerca de 10% de economia de combustível. Contudo é relevante observar que a eficácia dessa redução pode variar consoante o tipo de navio. O custo de implementação está estimado entre 2% e 3% do custo de construção de um novo navio.

### 4.3 Panorama dos Desafios e Oportunidades

#### 4.3.1. Incertezas Consoante ao Uso de Combustíveis Sustentáveis

O percurso rumo à descarbonização da indústria marítima apresenta um desafio complexo, caracterizado por incertezas significativas em diversos aspetos técnicos, económicos e regulatórios. A transição para combustíveis mais limpos envolve um conjunto de questões que ainda não foram completamente resolvidas. As incertezas relacionadas com o ciclo de vida dos novos combustíveis, especialmente no que diz respeito à emissão de gases de efeito de estufa, são particularmente preocupantes. Por exemplo, embora o LNG seja frequentemente apresentado como uma alternativa mais limpa que os combustíveis fósseis tradicionais, a sua utilização está associada a emissões de metano, um GEE extremamente danoso. Esta situação é exacerbada pelas dificuldades em quantificar e controlar as fugas de metano ao longo de toda a cadeia de abastecimento (IPCC, 2013; *Transp. Research, Part D*, 2017).

Além disso, a infraestrutura necessária para suportar a adoção de novos combustíveis marítimos ainda está na sua fase inicial de desenvolvimento. A falta de instalações adequadas para o armazenamento e distribuição de LNG e hidrogénio verde, por exemplo, representa uma barreira significativa. O custo de adaptação ou construção de novos terminais abastecimento, bem como a necessidade de atualizar os navios existentes para compatibilidade com os combustíveis alternativos, impõe desafios financeiros consideráveis. Esta situação é agravada pela volatilidade nos preços dos novos combustíveis, que afeta diretamente a viabilidade económica da transição energética (*Appl. Sci.*, 2023).

As incertezas económicas são igualmente preocupantes. A análise de custo-eficiência para a implementação de combustíveis alternativos revela disparidades regionais significativas nos preços, o que pode influenciar a adoção desigual dessas tecnologias entre as regiões norte-americanas, europeias e asiáticas, afetando a economia de escala e, conseqüentemente, a decisão das empresas de investir em novas tecnologias (*Transp. Research*, 2022).

Regulamentações e políticas governamentais também adicionam uma camada de complexidade ao processo da descarbonização. A Organização Marítima Internacional (IMO) têm estabelecido metas ambiciosas para a redução de emissões de GEE, mas a implementação



prática dessas políticas pode variar significativamente entre as diferentes jurisdições. A falta de um quadro regulatório uniforme e as divergências nas normas locais, dificultam a criação de uma estratégia global coesa para a descarbonização (IPCC, 2013).

Portanto, enquanto a descarbonização é uma meta crucial para mitigar as mudanças climáticas, o processo está repleto de incertezas que necessitam de abordagens multifacetadas e coordenadas para serem resolvidas. A investigação contínua e a colaboração internacional serão fundamentais para superar os desafios técnicos, económicos e regulatórios que caracterizam essa transição.

#### 4.3.2. *Corredores Sustentáveis*

No âmbito da COP 26, vinte e dois países subscreveram a Declaração de Clydebank (UK *Department for Transport*, 2023). Os países signatários comprometeram-se a estabelecer, até 2025, no mínimo seis corredores verdes com o intuito de acelerar o desenvolvimento de combustíveis com emissões nulas, infraestruturas de baixo carbono, bem como legislação e regulamentação eficazes.

Os corredores ecológicos ou verdes são rotas marítimas totalmente descarbonizadas, incluindo infraestruturas terrestres e navios, que navegam entre dois ou mais portos. O objetivo subsequente é expandir esses corredores pilotos, criando mais rotas, rotas mais longas e/ou aumentando o número de navios que transitam por essas rotas.

Um corredor verde não constitui um conjunto rígido de regras. Pelo contrário, representa um ecossistema cuidadosamente elaborado com fatores de mudança, que se assemelha a uma zona económica especial. Esses fatores envolvem tecnologia portuária e marítima, uso de combustíveis sustentáveis por todo o ecossistema envolvido e otimização das rotas. Os corredores verdes podem operar a nível nacional, em rotas marítimas de curta distância, ou entre continentes e diversos portos.

Para alcançarem sucesso, as rotas verdes devem ser otimizadas por meio de esforços combinados dos operadores privados e das autoridades públicas. O investimento público, o aumento dos subsídios dos combustíveis fósseis para os combustíveis com emissões nulas e políticas específicas que introduzam orientações sobre as melhores práticas, são fundamentais para incentivar a adoção de novas tecnologias e atingir a descarbonização.

A implementação de corredores ecológicos é crucial na transição para a descarbonização do transporte marítimo, visto que, ao longo da próxima década e seguintes, espera-se que esses corredores funcionem como catalisadores da transição energética global, proporcionando estruturas de colaboração entre as partes interessadas, regionais e internacionais, em metas de descarbonização marítima, alinhando-se com iniciativas regionais, nacionais e internacionais mais amplas de descarbonização. Como em todos os elementos da transição energética global, o número de partes interessadas e os recursos disponíveis podem representar um desafio.



Portanto, a seleção das rotas deve ser baseada em dados reais, visando a descarbonização em larga escala e a implementação técnica e economicamente viável.

As promessas feitas pelos signatários da declaração de Clydebank refletem uma vontade política de acelerar a descarbonização e, até o momento, foram anunciadas diferentes iniciativas e diversos planos para desenvolver estes corredores, envolvendo vários tipos de navios, combustíveis e tecnologias. A figura 19 apresenta o panorama de mais de cinquenta corredores marítimos ecológicos anunciado até ao momento. Encontram-se todos na fase inicial de planeamento. Contudo, demonstram a determinação dos intervenientes do setor em prosseguir estes objetivos políticos.



**Figura 19.** Corredores Marítimos Sustentáveis.

Fonte: DNV, 2024.

De acordo com a base de dados da DNV, até fevereiro de 2024 foram registadas 57 iniciativas de corredores verdes de navegação. Os anúncios dessas iniciativas duplicaram, passando de 22 em 2022 para 44 em 2023, o ano em que a IMO publicou a revisão da estratégia de redução dos gases de efeito de estufa. Em novembro de 2023, o Fórum Marítimo Mundial publicou um relatório abrangente sobre o progresso dos corredores ecológicos de transporte marítimo, apresentando uma visão geral sobre os 44 corredores.

Neste relatório é evidenciada uma duplicação de iniciativas e um aumento significativo no número de intervenientes envolvidos. Regista-se também um notável incremento no nível de maturidade destas iniciativas, com diversos corredores avançando nas suas fases de desenvolvimento, decidindo sobre os combustíveis prioritários e estabelecendo metas operacionais. Além dos números, há amplas evidências de que os corredores verdes estão a promover atividades de pré-investimento.

O amadurecimento destas iniciativas trouxe também à tona um novo conjunto de desafios identificados em 2024. À medida que os corredores se aproximam da sua fase de implementação e passam à fase comercial, surgem novos problemas, agravando questões pré-existentes. Apesar dos avanços significativos na definição das vias de utilização dos



combustíveis, muitos corredores ainda não tomaram decisões fundamentais a esse respeito. A complexidade da gestão dos corredores, como iniciativas intersectoriais e multilaterais, continua a atrasar o progresso em várias categorias. No âmbito comercial, foram identificadas lacunas na compreensão de negócios adequados para viabilizar a sua implementação. No plano político, a necessidade de apoio à implementação exige um aumento dos recursos e de capacidades governamentais.

Há evidências de progressos significativos no estabelecimento de cadeias de abastecimento de combustíveis com emissões nulas em áreas estratégicas para os corredores verdes. Por exemplo, no Porto de Gotemburgo, foram alcançadas 50 Ktons na produção de e-metanol, que estará operacional a partir de 2025. Em Singapura, a Autoridade de Mercado de Energia está à procura de propostas para desenvolver 1 Mtons de amoníaco para abastecimento até 2027. Além disso, o Banco Mundial está concluindo um estudo de viabilidade sobre o potencial de produção de amoníaco verde na região da Baía de Saldanha, na África do Sul, tendo em vista a exploração de um corredor verde de transporte de minério de ferro.

Vários portos dos corredores estão empenhados em aumentar a sua prontidão para o abastecimento com emissões zero. Os portos de Singapura, Roterdão e Gotemburgo já concluíram ensaios de abastecimento de metanol “*Ship-to-Ship*”, enquanto Singapura, Pilbara, Roterdão, Antuérpia, Houston e Coreia do Sul estão realizando avaliações de segurança e de viabilidade para o abastecimento de amoníaco. Adicionalmente, alguns portos iniciaram a harmonização das normas de abastecimentos através dos corredores.

O progresso alcançado até o momento indica que o movimento está, em grande parte, no caminho certo, mas a necessidade de manter o foco é imperativa. Para que os corredores atinjam suas metas, os próximos anos devem ter avanços significativos, com a execução das iniciativas de antecipação e a prontidão de outras para seguirem rapidamente. Todo o ecossistema de transporte marítimo precisa de apoiar os pioneiros e adotar as melhores práticas para agilizar o desenvolvimento como um todo.

Além disso, os corredores verdes podem servir como importantes plataformas de teste, validação e escala de novas soluções e tecnologias de combustíveis, tendo em vista a descarbonização e a digitalização.

Nesse contexto, a digitalização será um facilitador fundamental para futuros corredores eficientes e inteligentes, possibilitando a otimização digital para desbloquear potenciais de economia de energia. Num corredor ou rede de transporte verde digital, a maior integração e comunicação entre navios serão fatores cruciais. Isto inclui padronização, melhor planeamento, programação simplificada, logística eficiente e maior integridade e transparência das informações. O uso de ferramentas digitais também aumenta a utilização e o desempenho da frota, levando a uma redução de energia e de custos. Ademais, a tecnologia digital desempenha um papel fundamental na preparação para o surgimento de operações dentro do sistema logístico.





## 5. CASO DE ESTUDO: IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA NUM NAVIO DE CRUZEIRO

Como demonstrado na primeira parte deste trabalho, a procura contínua por práticas marítimas mais sustentáveis e eficientes inclui a criação de novos métodos e processos para operar motores Diesel, bem como a adaptação de novas tecnologias com o objetivo de otimizar o consumo de combustível e reduzir as emissões de GEE.

A partir de 2020, foram impostas restrições que limitam a quantidade de enxofre no combustível marítimo utilizado. Armadores e pesquisadores têm-se concentrado em estudar e investir em várias estratégias para cumprir com estas restrições. A instalação de torres de lavagem em navios destaca-se como uma das estratégias preferidas da indústria marítima para alcançar a conformidade com a limitação de emissões de SO<sub>x</sub> nos navios em operação. No entanto, surge o problema das emissões de outros poluentes, como o NO<sub>x</sub>, e analisar até que ponto as torres de lavagem (*Scrubbers*) podem contribuir - ou não - para o caminho rumo à descarbonização.

A lavagem dos gases de evacuação emerge como uma solução eficaz para evitar as emissões de SO<sub>x</sub> em navios. Ainda assim, esta abordagem provoca um consumo adicional de energia nos geradores Diesel, resultando consequentemente num consumo complementar de combustível. Portanto, uma vez que o óleo combustível pesado (HFO) é utilizado em navios equipados com torre de lavagem para reduzir as despesas operacionais, com exceção das relacionadas com o SO<sub>x</sub>, existe a possibilidade de aumentar outros tipos de emissões devido ao consumo adicional de combustível.

Apesar de inúmeros estudos existentes sobre este assunto, identifica-se uma lacuna, uma vez que, até o momento não foram realizados estudos técnicos mais aprofundados que realmente evidenciem os impactos que as instalações das torres de lavagem em navios possam acarretar no contexto da sustentabilidade. Adicionalmente, observa-se, da mesma forma, a ausência de análises relacionadas com os impactos energéticos que tais tecnologias poderiam acarretar no próprio objetivo final de redução do consumo de combustíveis e otimização da eficiência energética dos navios.

### 5.1. Apresentação da Investigação

Este capítulo tem como propósito apresentar um estudo mais aprofundado sobre iniciativas em curso referentes à inclusão de torres de lavagem em navios, com o intuito de reduzir os custos de operação associados à queima de óleo combustível pesado (HFO) em motores Diesel. Além disso, pretende-se dar uma visão mais abrangente da instalação dessas torres, de modo a que seja possível alcançar a sustentabilidade no transporte, mesmo diante do desafio representado pela queima de combustíveis não-bio. Este estudo realiza uma análise técnica do impacto efetivo da instalação de torres de lavagem num navio de cruzeiro, através de cálculos matemáticos fundamentados em dados reais de equipamentos e máquinas de um navio de cruzeiro existente e em operação, os quais serviram de base aos cálculos relativos à situação do navio no que diz respeito às emissões de poluentes. Para isso, foram considerados dois



cenários, o primeiro, onde as torres de lavagem não estão instaladas, em comparação com o segundo, no qual as torres estão presentes e operando plenamente. Além disso, são analisados os efeitos resultantes das diversas medidas para melhorar a eficiência energética implementadas no navio.

## 5.2. Contribuições Advindas do Estudo de Caso

Neste estudo, realiza-se a investigação de viabilidade da instalação das torres de lavagem e outras tecnologias disponíveis para colocar os navios existentes no rumo descarbonização sem que seja necessário mudar para um combustível mais dispendioso.

Este estudo oferece diversas contribuições relevantes. Em primeiro lugar, destaca-se a análise da instalação da torre de lavagem, os tipos e utilizações bem como a sua instalação e viabilidade financeira, a qual é conduzida com base em dados de navegação de um navio em tempo real. Para obter-se uma visão mais abrangente, são também apresentadas outras opções para que os operadores e gestores dos navios possam manter-se em conformidade com todas as regulamentações em vigor sobre poluição do ar.

Além disso, o estudo, abordado sob perspetivas ambientais e económicas, proporciona uma visão abrangente da questão em análise. Portanto entende-se que, embora a aplicação do lavador seja capaz de reduzir as emissões de SO<sub>x</sub>, existe um resultado negativo evidenciado pelo impacto noutras emissões, decorrente do aumento no consumo de combustível pesado. Tendo em consideração esta constatação, propõe-se apresentar a quantificação do impacto nocivo das emissões destes poluentes e, adicionalmente, visa avaliar alternativas tecnológicas com o objetivo de mitigar os efeitos das emissões de outros gases igualmente nocivos.

## 5.3. Enquadramento Teórico

Como já foi parcialmente abordado acima, na literatura marítima, existem três opções mais viáveis atualmente para cumprir as restrições de SO<sub>x</sub> introduzidas pela IMO: alteração de combustível, adoção de gás natural liquefeito (LNG) como combustível e implementação de um sistema de lavagem de gases de evacuação (*Scrubber*). Na primeira opção, é possível operar o navio em conformidade com os limites de enxofre usando gasóleo marítimo com 0,1% de teor de enxofre nos SO<sub>x</sub>-ECAs e usando óleo combustível com muito baixo teor de enxofre (VLSFO) em áreas globais. A segunda opção, consiste em adaptar e instalar o sistema de LNG nos navios. Embora tal abordagem proporcione uma redução notável em quase todos os poluentes, tem as desvantagens de exigir um grande custo de investimento inicial, requisitos de instalação do sistema no navio (espaço do tanque, projeto das tubagens) e imaturidade da cadeia de abastecimento de combustível. A adaptação do navio para utilização do LNG será analisada sucintamente mais adiante. A terceira, é a aplicação a bordo de um sistema de lavagem dos gases de evacuação.

A instalação de lavadores de gases de evacuação permite que os armadores operem os seus navios de forma mais económicas com HFO, que tem um teor de enxofre de 3,5%. Neste



método, os gases de evacuação emitidos para a atmosfera são purificados de quase todo o enxofre através de lavagem. Entre estas três opções, o LNG está projetado para navios novos, enquanto as outras têm sido preferidas principalmente durante o cumprimento das regras sobre o limite máximo de enxofre adotado em 2020 pela IMO.

Na literatura, estas três abordagens têm sido frequentemente analisadas de forma comparativa. Apesar do enorme custo de investimento com a instalação de LNG, entende-se que poderá ser uma boa opção para navios novos. Foram estudados vários métodos de redução de emissões que mostraram que os efeitos podiam variar de acordo com alguns parâmetros, como a dimensão do motor e o preço do combustível. Verificou-se também que, embora o uso de combustível destilado fosse preferido até ao ano de 2020, a implementação de purificadores para navios existentes ganhou destaque após o início das restrições. Observou-se que, enquanto os navios equipados com lavadores favoreciam a navegação a alta velocidade, os navios que utilizavam combustíveis destilados mais caros, como o MGO/MDO, optavam por navegação a baixa velocidade com o objetivo de reduzir os custos com o combustível.

Numa pesquisa realizada junto a indústria marítima coreana, os pesquisadores concluíram que um lavador de gases poderia representar uma opção vantajosa, considerando as discrepâncias nos preços dos combustíveis e as taxas de redução de enxofre. Foram identificados os parâmetros que influenciariam o processo De-SO<sub>x</sub>, e foi proposto um novo projeto de *Scrubber* de circuito aberto visando minimizar o consumo energético das bombas do sistema (A-Rom, K e Young-Joon, S., 2019).

Em 2021, Yang, J., juntamente com outros pesquisadores, realizaram uma análise experimental para determinar a eficiência dos “*scrubbers*” num navio porta-contentores, demonstrando que os teores de SO<sub>x</sub> e PM nos gases de evacuação diminuíram em mais de 95% e aproximadamente 10%, respetivamente. A experiência foi realizada num navio equipado com um motor Diesel de dois tempos e uma torre de lavagem de circuito aberto, obtendo-se uma redução de SO<sub>2</sub> de 93%. Estudos experimentais semelhantes foram realizados com diferentes tipos de motores Diesel a diversos regimes de carga, evidenciando uma taxa de redução de SO<sub>x</sub> de até 99%.

Outra consideração crucial reside na escolha do tipo de torre de lavagem mais adequada para instalar no navio. Embora os *scrubbers* de sistema aberto possam apresentar uma solução mais simplificada e barata, é necessário considerar possíveis restrições em determinadas áreas portuárias devido às regulamentações restritivas sobre a água de lavagem, o que pode afetar a eficiência operacional.

No caso das torres de lavagem de circuito fechado, é imprescindível contemplar a gestão da água utilizada no processo de lavagem dos gases de evacuação. A capacidade de operar eficazmente a água de lavagem e a eventual necessidade de sistemas adicionais de tratamento ou armazenamento devem ser cuidadosamente avaliadas pelos armadores.



Aspetos relacionados com a manutenção e durabilidade também devem ser levados em consideração. Os “scrubbers” de sistema aberto podem exigir uma menor manutenção, embora possam estar sujeitos a uma corrosão mais rápida devido ao contacto direto com a água do mar. Por outro lado, os lavadores de sistema fechado podem exigir mais atenção para garantir o tratamento e descarga adequada da água utilizada.

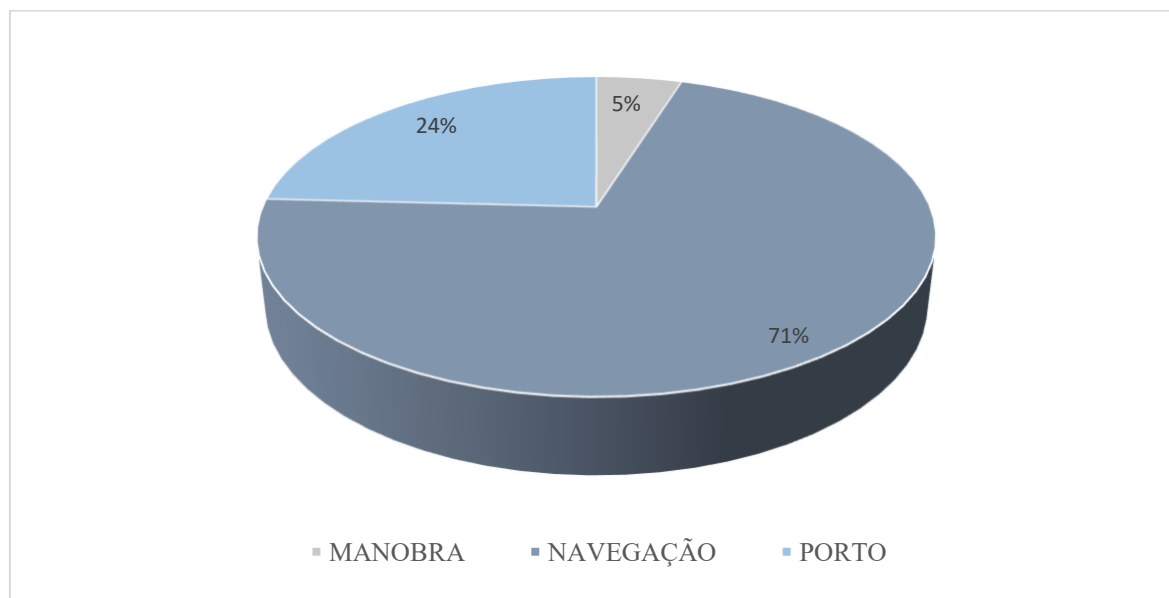
#### 5.4. Recolha de Dados

Foi escolhido um típico navio de passageiros de 102239 GT como modelo para este estudo, estando as suas características e especificações detalhadas na tabela 17. A recolha dos dados das viagens a serem estudadas foram extraídas do diário eletrónico de bordo, referente ao mês de abril de 2024. O navio analisado no presente estudo encontra-se representado na fotografia incluída no Anexo III. Esta imagem foi captada durante a fase final do processo de docagem, realizado nas instalações do estaleiro da Navantia, localizado em Cádiz, Espanha.

Especificações do Navio	
Tipo de Navio	Navio de cruzeiro
Arqueação bruta (GRT)	102239 tons
Porte Bruto (DWT)	10984 tons
Comprimento total (LOA)	272.8 m
Boca	35.5 m
Tipo de propulsão / Potência Prop.	Diesel-Elétrica / max. Prop Power = 2x 20MW at 150RPM
Grupo Gerador	6 sets x Wartsila Sulzer ZA40S Diesel engines
Potência do Grupo Gerador	4 Sets x 11.2MW + 2 Sets x 8.4MW = 61.6MW Tot. Potência Nominal
Torre de lavagem	Torres de Lavagem de circuito aberto instaladas nos 6 DG's

**Tabela 17.** Caraterísticas Principais do Navio a ser Estudado.

Para realizar esta análise, foram recolhidos inicialmente dados de consumo energético referentes a um mês de viagem do navio estudado, o qual usualmente realiza rotas entre os Estados Unidos e a zona leste das Caraíbas. Com base nos dados de viagem em tempo real obtido durante o mês de abril de 2024, os dados sobre o tempo médio gasto em cada modo de operação do navio de passageiros, está representado na figura 20.



**Figura 20.** Perfil Operacional do Navio.

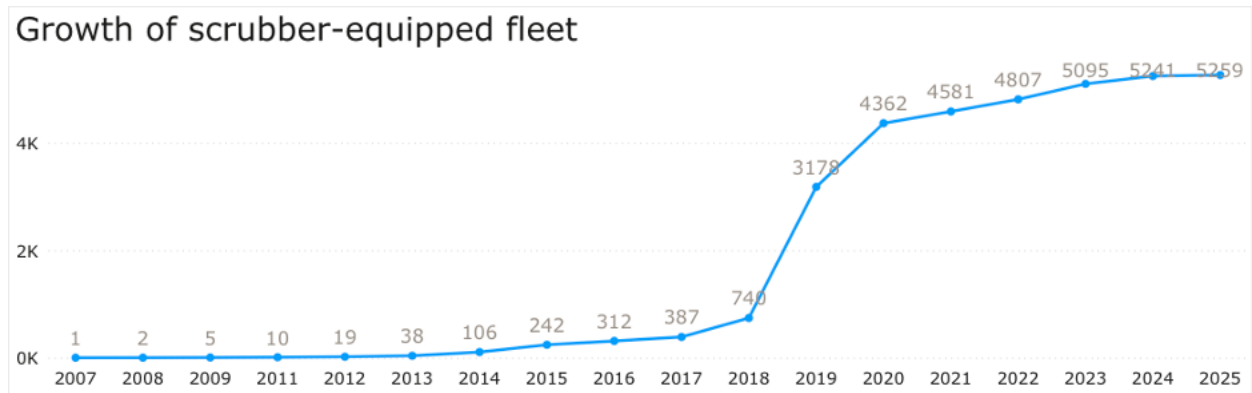
Na figura 20 mostra-se que o navio passou 71% do tempo em modo de trânsito, 24% do tempo atracado no porto ou ancorado e 5% do tempo em manobra de entrada e saída do porto.

Neste estudo, devido a ausência de dados armazenados na situação anterior à instalação das torres de lavagem, e às especificidades do navio em questão, foi proposta uma nova abordagem, que será seguidamente descrita.

Considerando que a metodologia utilizada para o cálculo das emissões permite tal procedimento, irão calcular-se as emissões de poluentes do navio em questão em três situações distintas. No primeiro cenário, será considerado o navio a queimar óleo pesado (HFO), sem instalada qualquer tecnologia de redução de emissões, caracterizando uma situação teórica. No segundo cenário, novamente seria avaliada a queima do óleo combustível pesado HFO, com torres de lavagem instaladas, além de outras tecnologias que serão discutidas posteriormente. Por fim, no terceiro cenário, será considerada a queima de óleo diesel marítimo (MGO) sem torres de lavagem ou qualquer outra tecnologia instalada. Adicionalmente aos três cenários mencionados anteriormente, será incluída uma quarta situação hipotética apenas para efeito de comparação. Neste caso, o navio irá utilizar LNG como combustível, sendo que o navio em questão não dispõe de uma instalação para a queima deste tipo de combustível.

## 5.5. Metodologia do Estudo

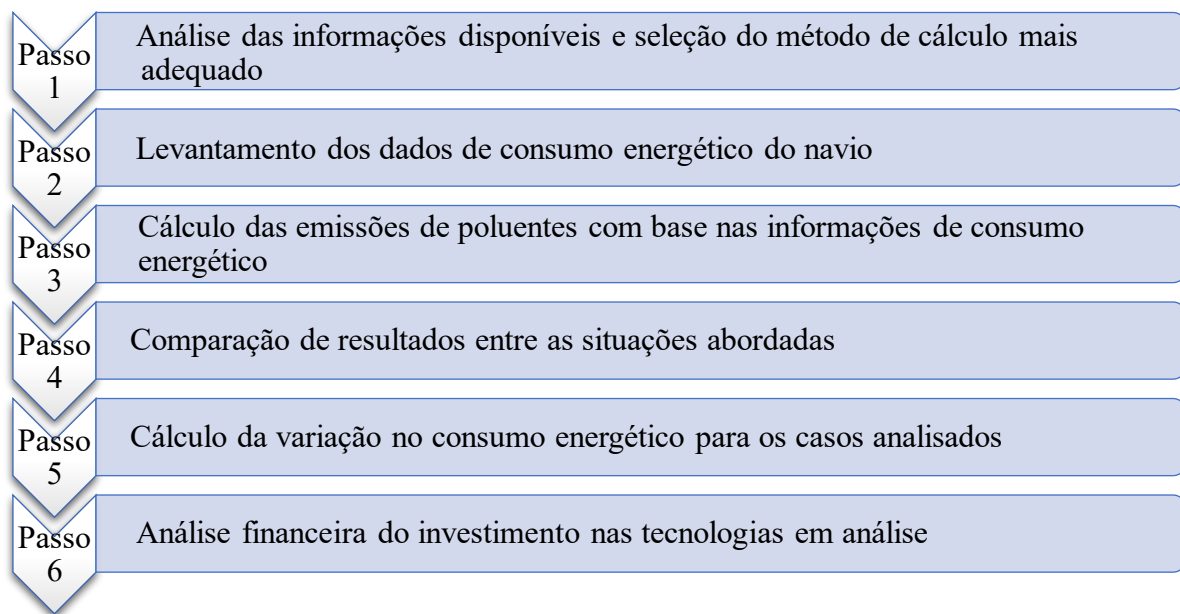
No contexto do cumprimento das regulamentações de enxofre estabelecidas pela IMO 2020, a utilização de lavadores em navios é uma solução geralmente preferida pelos armadores. O número de navios equipados com torres de lavagem tem aumentado anualmente, conforme evidenciado na figura 21.



**Figura 21.** Crescimento Anual da Instalação das Torres de Lavagem na frota Mundial.

Fonte: DNV, 2024. Veracity Platform.

Apesar dos *scrubbers* terem sido a escolha predominante para cumprir as normas cada vez mais rigorosas de emissões de SO<sub>x</sub>, pressupõe-se que a adaptação deste sistema implica algumas alterações no funcionamento do navio para além da redução das emissões de SO<sub>x</sub>. Portanto, este estudo analisa o sistema de torres de lavagem por meio de uma abordagem metodológica detalhada, apresentada na figura 22.



**Figura 22.** Metodologia do Estudo.

É importante lembrar que a análise de viabilidade neste estudo de caso está restringida ao projeto de lavador em circuito aberto, uma vez que o navio base do estudo está equipado com este tipo específico de torre de lavagem. Contudo, os cálculos a seguir podem ser facilmente aplicados ao conjunto de dados provenientes de novos navios que possuam diferentes tipos de lavadores. Além disso, a análise e os resultados deste estudo fornecem uma visão significativa para os sistemas de lavagem de gases de evacuação de uma forma geral.



Com o objetivo de obter uma estimativa precisa das emissões totais de gases poluentes decorrentes das atividades marítimas, vários pesquisadores desenvolveram diferentes metodologias, cada uma apresentando novas perspectivas e modelos para quantificar as emissões de poluentes atmosféricos.

Ao longo dos últimos anos, o guia de inventário de emissões de poluentes atmosféricos da EMEP (*European Monitoring and Evaluation Programme*), regularmente publicado e atualizado pela Agência Europeia do Meio Ambiente, especialmente no Capítulo 1.A.3.d "Navegação", apresentou uma metodologia abrangente, amplamente discutida que se tornou uma boa referência para investigadores de todo o mundo para a quantificação das emissões de poluentes em diversos setores. Destaca-se, ainda, o projeto MEET (*Methodologies for Estimating air pollutants Emissions from Transport*) melhorada pelo especialista Carlo Trozzi, que desenvolveu uma metodologia ampla para a quantificação das emissões, sendo utilizada com acréscimos e correções em variados contextos. Essas metodologias emergem como referência para realizar uma estimativa de emissões a nível internacional, juntamente com o quarto estudo sobre gases de efeito de estufa da IMO, que irão servir como fundamento para este caso de estudo.

Segundo o EMEP/EEA (*European Environmental Agency*), as emissões podem ser estimadas e expressas com três diferentes níveis de crescente complexidade (de forma semelhante às Diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas do IPCC para Inventários Nacionais de Gases de Efeito de Estufa de 2006).

Apesar das diversas metodologias apresentarem variações não muito drásticas entre si, podem ser resumidas e categorizadas essencialmente nos seguintes três grupos: abordagem totalmente ascendente *Bottom-up*; abordagem totalmente descendente *Top-down*; combinação de ambas (*Fourth IMO Greenhouse Gas Study -2020*). Essas categorias podem também ser obtidas na literatura como níveis (tiers) 1-3 que se distinguem pela avaliação das emissões e pela caracterização geográfica do navio (*European Environmental Agency, 2023 e Trozzi, C., 2010*).

A abordagem "*bottom-up*" completa avalia as emissões de um único navio, considerando as suas características, como tipo, data de construção, carga, potência do motor e consumo específico de combustível, para uma condição de carga específica. Essa abordagem permite identificar e avaliar os contribuintes primários das emissões, proporcionando uma compreensão clara dos efeitos nas emissões primárias.

Por outro lado, uma abordagem totalmente "*top-down*" considera as emissões a uma escala mais global, utilizando fatores generalizados, como estatísticas sobre o uso de diferentes tipos de combustíveis e tipos de motores instalados em navios específicos, como indicadores de emissões.

Neste estudo, apresenta-se uma descrição detalhada do algoritmo utilizado no *Tier 3*, que consiste essencialmente numa combinação das abordagens "*bottom-up*" e "*top-down*". Este



método irá ser usado na pesquisa e também é recomendado quando os dados detalhados sobre a movimentação de navios e informações técnicas específicas de navios (como tamanho, tecnologia do motor, potência instalada, consumo de combustível e horas em diferentes atividades) estão disponíveis para estimar as emissões durante a navegação em mar aberto, manobras durante a aproximação aos portos e durante a permanência no cais do porto (hotel).

A Metodologia 3 utiliza a capacidade instalada e o consumo de combustível como opções para realizar as estimativas de emissões, contemplando tanto os motores principais como os motores auxiliares. Esta abordagem calcula as emissões durante a navegação ao somar os resultados de emissões de cada viagem. Para uma única viagem, as emissões podem ser expressas da seguinte forma:

$$E_{viagem} = E_{cais} + E_{manobra} + E_{navegacao} \quad (Eq.1)$$

Quando os consumos de combustível são conhecidos, as emissões podem ser calculadas com fatores de emissão relacionados com o combustível para as diferentes fases da navegação (cruzeiro, cais e manobras). Assim, as emissões de poluentes podem ser calculadas através de:

$$E_{viagem} = \sum_p (FC_{j,m,p} \times EF_{f_i,j,m,p}) \quad (Eq.2)$$

Onde:

- $E_{viagem}$  = emissão ao longo de uma viagem completa (toneladas);
- FC = consumo de combustível (toneladas);
- EF = fator de emissão (kg/tonelada);
- $i$  = poluente (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, PM);
- $m$  = tipo de combustível (HFO, MDO/MGO, LNG);
- $j$  = tipo de motor (lento, média e alta velocidade);
- $p$  = as diferentes fases da viagem (cruzeiro, hotel e manobras).

Quando não se dispõe da informação sobre o consumo de combustível por fase de viagem, uma metodologia alternativa, ainda dentro do nível 3, é sugerida para efetuar o cálculo das emissões. Essa abordagem baseia-se na potência instalada e no tempo despendido nas diversas fases da navegação. As emissões podem ser calculadas a partir do conhecimento detalhado da potência instalada do motor principal e auxiliar, do fator de carga e do tempo total gasto em horas para cada fase, utilizando a seguinte equação:

$$E_{viagem} = \sum_p (T_p \times AE_e \times LF_e \times EF_{f_e,i,j,m,p}) \quad (Eq.3)$$



Onde:

- $E_{Trip}$  = emissão ao longo de uma viagem completa (toneladas),
- LF = fator de carga do motor (%),
- EF = fator de emissão (kg/tonelada),
- P = Potência nominal do motor (kW)
- T = Tempo (horas)
- e = Tipo de motor (auxiliar/principal)
- i = poluente (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, PM)
- m = tipo de combustível (HFO, óleo diesel marítimo/gasóleo marítimo (MDO/MGO), GNL, gasolina),
- j = tipo de motor (lento, Diesel de média e alta velocidade, turbina de gás e turbina de vapor).
- p = as diferentes fases da viagem (cruzeiro, hotel, manobras).

O tempo de navegação pode ser calculado através de:

$$T_{navegacao}(\text{horas}) = \frac{\text{Distância navegada (milhas)}}{\text{Velocidade média de navegação(milhas/hr)}} \quad (\text{Eq.4})$$

Nesse estudo, devido às particularidades do navio em questão e à necessidade de comparar diversos tipos de combustíveis, adota-se uma abordagem singular. Os dados do consumo de combustível são obtidos através da recolha de dados de consumo energético do navio, juntamente com o consumo específico de cada combustível, tabelado no quarto estudo da IMO, durante o período estudado, visando assim obter informações mais precisas sobre o consumo dos diferentes tipos de combustíveis.

#### 5.5.1. Fatores de Emissão

Para cada nível e algoritmo de cálculo das emissões, é necessário utilizar fatores de emissão específicos. Enquanto as metodologias 1 e 2 dispõem de fatores de emissão tabelados, a metodologia mais complexa, adotada no presente estudo, exige o cálculo de fatores de emissão específicos. Os cálculos e fórmulas utilizados neste estudo foram elaborados por especialistas no assunto através de testes em motores que conduziram ao desenvolvimento de fatores de emissão dependentes da carga do motor para cada tipo de operação do navio, seja em navegação, manobra ou hotel (cais) (IMO, 2020).

As emissões de cada sistema (ou seja, motor principal, motor auxiliar e caldeira) foram divididas em dois grupos com base na forma como as emissões são geralmente calculadas:

1. Cálculo baseado na energia: os poluentes são calculados em função da potência do motor/caldeira ( $\dot{W}_i$ ), usando um fator de emissão baseado em energia (EF<sub>e</sub>) em g poluente/kWh. As emissões horárias ( $E_i$ ) são então calculadas da seguinte forma:

$$E_i = EF_e \times \dot{W}_i \quad (\text{Eq.5})$$



Sendo:

$$\dot{W}_i = AE_{[kW]} \times LF_{[\%]} \quad (\text{Eq.6})$$

As seguintes emissões entram neste grupo: óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), monóxido de carbono (CO), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), partículas (PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub>) e orgânicos voláteis não metano (NMVOC).

2. Cálculo baseado no combustível: utilizado para poluentes que são calculados dependendo da quantidade de poluente encontrado no combustível e do tipo de motor. As emissões são obtidas multiplicando o consumo horário de combustível (FC<sub>i</sub>) pela emissão baseada em combustível (EF<sub>f</sub>) em g poluente/g combustível:

$$E_i = FC_i \times EF_f \quad (\text{Eq.7})$$

Neste grupo de emissões tem-se CO<sub>2</sub>, óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) para motores diesel marítimos. Neste contexto, observam-se diferenças substanciais na forma como os fatores de emissão são estimados, o que acarreta alterações de até 30% nas emissões totais, dependendo do tipo de poluente (*Fourth IMO GHG study*, 2020).

Com base nos resultados de testes extensivos realizados com diversos tipos de motores, os quais consomem HFO e MDO para diferentes condições de carga, conforme publicado por Cooper, D e Gustaffon, T. (2004), além de consultas a vários fabricantes de motores, os resultados desses testes sugerem a conversão de EFe para as suas equivalências baseadas em combustível EF<sub>f</sub> por meio do SFC base, conforme expresso na seguinte equação:

$$EF_f = \frac{EF_e}{SFC_{base}} \quad (\text{Eq.8})$$

O SFC base dos motores principais, auxiliares e caldeiras é a representação numérica do menor consumo específico de combustível da curva de carga, ou seja, é o ponto de melhor eficiência relativamente ao consumo de combustível do motor. A tabela 18 representa o SFC base a ser utilizado neste estudo.



SFC Base [kg/KWh]	
Óleo Combustível Pesado (HFO)	205
Óleo Diesel Marítimo (MGO)	190
Gás Natural Liquefeito (LNG)	156
Metanol (MeOH)	370

**Tabela 18.** Consumo Específico de Combustível (SFC).

Fonte: IMO Fourth GHG Study, 2020

#### 5.5.1.1. Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) - Fator de emissão baseado em combustível

A IMO divulgou os fatores de emissão de CO<sub>2</sub> expressos em emissões por quantidade de combustível no documento MEPC<sup>25</sup>.1/Circ.684. Esses fatores de emissão representam o conjunto predefinido a ser utilizado na proposta de Regulamento MRV da UE, conforme detalhado na tabela 19 neste estudo.

Tipo de Combustível	Teor de Carbono	EFf (gCO <sub>2</sub> /gfuel)
HFO	0.8493	3.114
MDO	0.8744	3.206
LNG	0.7500	2.750
MeOH	0.3750	1.375
LSFO 1.0%	0.8493	3.114

**Tabela 19.** Fatores de Emissão para Diferentes Tipos de Combustível e o seu Teor de Carbono.

Fonte: IMO, 2009. MEPC.1/Circ.684.

Note-se que MDO refere-se a combustíveis marítimos destilados em geral, o que inclui o gasóleo marítimo (MGO). Relativamente ao fator de emissão do HFO, este baseia-se principalmente pelo teor do carbono e pelo poder calorífico do combustível. No entanto, o teor de enxofre do HFO também pode influenciar o fator de emissão, e, para os cálculos, costuma-se geralmente considerar uma taxa de enxofre típica que varia entre 2,5% a 3,5%.

Em particular, para motores que possuem injeção de combustível piloto em sistemas que consomem LNG, a quantidade de CO<sub>2</sub> produzida pelo combustível piloto é incorporada no EFf por ponderação da mistura de combustíveis principais e piloto na massa de CO<sub>2</sub> emitida.

<sup>25</sup> Marine Environmental Protection Committee (MEPC) – O Comité de Proteção do Meio Ambiente Marinho da IMO desenvolve e implementa regulamentos e medidas relacionadas com a prevenção e controlo da poluição por navios.



### 5.5.1.2. Óxidos de Enxofre (SO<sub>x</sub>) - Fator de emissão baseado no combustível

Conforme amplamente conhecido, as emissões de SO<sub>x</sub> variam em função do consumo de combustível e do seu teor de enxofre, embora possam ser reduzidas devido ao uso de torres de lavagem. Inicialmente, será considerada a não utilização das torres de lavagem no navio em estudo a fim de estimar o total de emissões sem tratamento de modo a proporcionar, uma base de comparação. O fator de emissão de SO<sub>x</sub>, baseado no combustível (g SO<sub>x</sub>/g de combustível), é calculado da seguinte forma (*Fourth IMO GHG Study*, pg. 74, 2020)::

$$EF_{f,SO_x} = 2 \times 0.97753 \times S \quad (\text{Eq.9})$$

Nesta equação considere-se que 97,753% do enxofre no combustível é convertido em SO<sub>x</sub> (o restante é convertido em aerossol de sulfato/sulfito e classificado como fazendo parte das partículas) e o "2" reflete a proporção do peso molecular do SO<sub>2</sub> em enxofre porque, para as emissões dos navios, a grande maioria do SO<sub>x</sub> é SO<sub>2</sub>.

### 5.5.1.3. Óxidos de Azoto (NO<sub>x</sub>) - Fator de emissão baseado na energia

As emissões de NO<sub>x</sub> resultam das altas temperaturas de combustão no motor, que oxidam o azoto presente no ar de admissão, bem como partículas de nitrogénio provenientes do próprio combustível. Portanto, para emissões de NO<sub>x</sub> de motores que utilizam o ciclo Diesel, o fator de emissão é uma função da velocidade do motor e do Tier do navio (ou seja, o ano em que o motor foi fabricado), independentemente do navio estar ou não a operar numa área de controlo de emissões de óxidos de azoto (NECA), uma vez que foi assumido que nenhum motor poderia ter um EFe superior ao estipulado pelo Anexo VI da IMO MARPOL Regulamento 13 (IMO, 2013b). A tabela 20 apresenta os diferentes EFe NO<sub>x</sub> em função da velocidade de rotação do motor.

Tier	Ano de Construção do Navio	Fatores de Emissão (EFe NO <sub>x</sub> ) n= RPM do motor		
		n < 130	130 ≤ n < 2000	n ≥ 2000
I	1 de janeiro de 2000	17.0	45*n <sup>-0.2</sup>	9.8
II	1 de janeiro de 2011	14.4	44*n <sup>-0.23</sup>	7.7
III	1 de janeiro de 2016	3.4	9*n <sup>-0.2</sup>	2.0

**Tabela 20.** Fatores de Emissão NO<sub>x</sub> por Velocidade e Idade do Motor.

Fonte: IMO, 2005. MARPOL Anexo VI, Regulamento 13.



5.5.1.4. Partículas (PM10 e PM2,5) - Fator de emissão baseado em energia

Ainda segundo o quarto estudo sobre gases de efeito de estufa da IMO, no caso das partículas, os fatores de emissão são influenciados pelo teor de enxofre do combustível e, portanto, são reduzidos ao operar em níveis mais baixos, como, por exemplo, com combustíveis de baixo teor de enxofre (por exemplo, ao operar em ECAs). Para motores alimentados com óleo pesado (HFO) e MDO/MGO, estima-se no presente estudo, o valor das partículas emitidas com base no teor de enxofre dos combustíveis utilizados durante o mês de abril de 2024, utilizando as seguintes fórmulas (*Fourth IMO GHG Study*, pg. 75, 2020):

HFO:

$$EF_e = 1.35 + SFC_i \times 7 \times 0.02247 \times (S - 0.0246). \quad (\text{Eq.10})$$

MDO/MGO:

$$EF_e = 0.23 + SFC_i \times 7 \times 0.02247 \times (S - 0.0024) \quad (\text{Eq.11})$$

O número 7 nas equações vêm da razão de peso molecular entre o sulfato das partículas (PM) e enxofre e o valor 0,02247 reflete a proporção do enxofre no combustível que é convertido em sulfato de PM

Na tabela 21 observa-se os valores obtidos para os fatores de emissão a ser utilizados neste estudo.

Combustível	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM
HFO	3.114	62.980	72.337	8.220
MGO	3.206	67.960	0.196	0.990
LNG	2.750	8.333	0.000	5.320

Tier I

**Tabela 21.** Fatores de Emissão [kg de poluente por toneladas de fuel].

As fórmulas de cálculo dos fatores de emissão, bem como as metodologias de cálculo das emissões de poluentes utilizadas no presente estudo, foram inicialmente apresentadas no Terceiro Estudo dos Gases de Efeito Estufa da IMO. Posteriormente, no Quarto Estudo dos Gases de Efeito de Estufa da IMO, em 2020, essas fórmulas e metodologias foram revistas e atualizadas por meio de consultas à literatura, fabricantes de motores, organizações de pesquisa, instituições académicas e sociedades classificadoras.



## 5.6. Resultado dos Cálculo das Emissões

Ao usar a metodologia indicada no item 6.5, procedeu-se à análise do cálculo das emissões para o navio em estudo nos três cenários distintos.

Através desta abordagem, que envolve a recolha de dados de consumo energético com e sem a utilização de sistemas de tratamento de gases de evacuação, juntamente com outras tecnologias instaladas, foi possível obter uma estimativa aproximada do consumo de combustível do navio nos cenários analisados. Essa análise permitiu quantificar as emissões de gases poluentes, cujos dados são representados na tabela 22.

Tipo de Combustível	Consumo mensal [ton.]
HFO	2703.679
HFO + Torre de lavagem + FID*	2802.331
MGO	2505.849
LNG	2057.434

**Tabela 22.** Consumo de Combustível Equivalente Mensal [ton].

\*FID – Equipamento destinado a reduzir a formação de óxidos de azoto e partículas, e que melhora a eficiência da combustão através da emulsificação do combustível em água.

Da análise aos cenários calculados e apresentados, observa-se que, embora a instalação das torres de lavagem e outras tecnologias de redução de emissões de poluentes tenha demonstrado uma boa eficácia na diminuição das emissões de enxofre e de partículas, conforme comprovado neste estudo, o aumento de consumo energético do navio resulta de uma maior utilização de óleo combustível pesado. Outro aspeto a ser considerado, é que a própria utilização das torres de lavagem permite ao navio queimar óleo combustível pesado com mais frequência, sem a necessidade de realizar a alteração para gasóleo marítimo. Portanto, tanto o aumento no consumo energético, como o uso contínuo do óleo pesado resultam num incremento das emissões de carbono e de óxidos de azoto, aspetos que exigem atenção e procura de soluções.

Devido ao uso de dois tipos distintos de combustíveis, que apresentam diferentes fatores de emissão de poluentes nos períodos considerados, houve variação nas emissões lançadas para a atmosfera. As conclusões referentes à libertação de emissões de poluentes estão representadas na tabela 23.



Combustível	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM
HFO	8419.3	170302.6	195576.6	22227.4
HFO + Torres de Lavagem + FID	8726.5	176516.5	6081.4	20734.6
MGO	8033.8	170302.6	489.9	2481.6
LNG	5657.9	17145.3	0.4	10946.6

**Tabela 23.** Emissão de Poluentes [tons].

Observa-se que, como resultado da instalação das torres de lavagem, as emissões de SO<sub>x</sub> são efetivamente reduzidas em 97%. No entanto, outros tipos de emissões aumentam devido ao maior consumo de óleo combustível pesado, como é o caso do CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, com um aumento de emissões de 4% para ambos no cenário anterior à instalação das torres de lavagem. Além disso, embora o efeito de redução das partículas seja de 7%, a quantidade deste poluente ainda constitui um problema a ser resolvido.

Relativamente a outros combustíveis, como o MGO, existe um grande diferencial de valores, no entanto as emissões de carbono ainda constituem um problema, com uma redução de apenas 8%, relativamente ao cenário após a instalação das torres de lavagem. No entanto, verificam-se grandes reduções nas emissões de enxofre e partículas, com 92% e 88% de efetiva redução, respetivamente.

Esta situação evidencia que a implementação da torre de lavagem é uma opção eficaz para cumprir com as restrições de enxofre. No entanto, tal decisão contraria a estratégia de descarbonização definida pela IMO. Perante isto, torna-se necessário implementar torres de lavagem em conjunto com outras tecnologias de redução das emissões de outros gases, contribuindo assim de forma efetiva para a estratégia de descarbonização da IMO.

Para efeitos de comparação, o gás natural liquefeito apresenta uma redução imediata em todos os poluentes considerados neste estudo, com redução de 35% para CO<sub>2</sub>, 90% para óxido de azoto, 100% de redução de emissões de enxofre e 47% de redução de partículas. Apesar dessas significativas reduções, existem diferenças para o sistema LNG escolhido, como a completa queima de gás natural ou com a utilização de combustível piloto, que acarreta emissões decorrentes do combustível utilizado.

Para além dos requisitos globais, os armadores também devem considerar o tempo que os seus navios naveguem numa área de controlo de emissões. As novas construções que têm de cumprir com os requisitos de emissão de NO<sub>x</sub> do Tier III da IMO enquanto operam dentro numa NECA devem usar uma tecnologia de redução de NO<sub>x</sub>, como por exemplo a recirculação de gases de evacuação (EGR) ou sistemas de redução catalítica seletiva (SCR), ou instalar motores que



funcionem com o ciclo Otto a gás ou duplo combustível ou motores de injeção de gás a baixa pressão.

É crucial salientar que a mitigação das emissões implica também custos adicionais. Por exemplo, o carbono pode ser capturado e armazenado, exigindo recursos específicos para essa finalidade. Portanto, estes custos devem ser cuidadosamente considerados no contexto das medidas de redução de emissões adotadas.

O navio em estudo está equipado com algumas tecnologias, para além das torres de lavagem, que visam otimizar o consumo de combustíveis e reduzir a emissão de poluentes. Um dos equipamentos utilizados é dispositivo de melhoria do combustível (FID) ou homogenizador de combustível (WFE), que melhora a eficiência da combustão dos motores ao homogenizar o combustível antes da injeção. Esse dispositivo fragmenta as partículas maiores em menores, misturando-as uniformemente e emulsificando o combustível com pequenas quantidades de água ou aditivos. Tal processo resulta numa combustão mais completa, diminuindo as emissões de hidrocarbonetos não queimados (PAH), fuligem, partículas, NO<sub>x</sub> e monóxido de carbono. Dessa forma, melhora-se a eficiência energética, reduzindo os custos operacionais e a manutenção. Adicionalmente, a vida útil dos equipamentos é prolongada devido a uma operação mais suave e eficiente. Através do sistema de emulsificação de água no combustível é possível obter uma redução de 60-90% de fuligem e partículas nos gases de evacuação; para cada 10% de água adicionada, alcança-se uma redução de 10% de NO<sub>x</sub>. Por fim, pode melhorar-se a eficiência da combustão até 2%. Outras vantagens incluem uma redução de 60% de fumo visível no arranque do motor e com baixas cargas e até 30% em carga média, além da redução do arrasto de água proveniente das torres de lavagem pelos gases de evacuação. Este estudo considerou o funcionamento da instalação de emulsão de água no combustível para o cálculo das emissões nos diferentes cenários. Os principais componentes do dispositivo de melhoria do combustível e uma breve explicação do seu esquema de funcionamento são apresentados no Anexo X.

Adicionalmente, é importante salientar que o navio do estudo não possui a tecnologia de captura e armazenamento de carbono e que, atualmente, essa tecnologia não é necessária, dado que a classificação CII é recente. No entanto, à medida que os valores e classificações do CII se tornem mais rigorosos, caso o navio obtenha uma classificação D por mais de três anos consecutivos ou uma classificação E, deve ser implementado um plano de ação visando melhorias. Este plano pode traduzir-se na instalação de equipamentos destinados à captura e armazenamento de carbono, cuja análise de CAPEX, de acordo com um estudo elaborado no âmbito do projeto *Green Fuels Optionality* (GFOP), está apresentada na tabela 24.



Item	LSFO	LNG	Metanol
Captura total de CO <sub>2</sub> [Tons/ano]	40700.0	31300.0	37700.0
CAPEX [\$M/ano]	4.4	3.2	3.9
OPEX [\$M/ano]	5.0	1.8	3.9
Armazenamento de CO <sub>2</sub> [\$M/ano]	1.0	0.8	0.9
Custo Total [\$M/ano]	10.4	5.8	8.8
Custo de Captura WTW [\$/tonCO <sub>2</sub> ]	280-290	220-230	250-260

**Tabela 24.** Cálculo do Custo de Redução de CO<sub>2</sub> Relativo a um navio VLCC.

Fonte: Mærsk Mc-Kinney Møller Center, 2022.

Foi analisada a viabilidade económica de instalação do CCS numa nova construção de um navio do tipo VLCC. Conforme apresentado na tabela 24, o custo varia de \$220 a \$290 dólares por cada tonelada de carbono capturada, dependendo do tipo de combustível utilizado. Cada opção apresenta um impacto económico diferente, conforme evidenciado na tabela supracitada. A implementação do CCS resulta numa diminuição efetiva nas emissões de CO<sub>2</sub> de 74% a 78%.

Relativamente ao potencial aumento no consumo energético provocado pelos novos equipamentos necessários ao funcionamento do CCS, verifica-se um incremento de 45% no consumo energético, o que acarretará, por conseguinte, um maior consumo de combustível e um maior potencial de emissões de poluentes, que devem ser considerados.

#### 5.6.1. Análise de Potência e Combustível

As necessidades médias de consumo energético nos cenários anteriores e posteriores à instalação das torres de lavagem também foram avaliados e estão apresentados na tabela 25.

Devido à dificuldade em obter dados referentes à situação anterior à instalação das tecnologias e com o mesmo perfil de navegação, as necessidades médias de energia e os valores totais do consumo de combustível anteriores à instalação das torres de lavagem, foram determinados com base no mesmo inventário de consumo energético do navio, referente ao mês de abril de 2024, excluindo-se o consumo energético das torres de lavagem e do FID.



CONSUMO ENERGÉTICO		
Sem Torres de Lavagem [MW]	Com Torres de Lavagem [MW]	Taxa de Aumento
13188.679	13669.906	3.65%
CONSUMO DE COMBUSTÍVEL		
HFO		
Sem torres de lavagem [ton]	Com torres de lavagem [ton]	Taxa de Aumento
2703.679	2802.331	3.65%
	<b>MGO [ton]</b> 2505.849	-11%
	<b>LNG [ton]</b> 2057.434	-27%

**Tabela 25.** Comparação da Necessidade Energética e do Consumo de Combustível nos Cenários Analisados

Em condições semelhantes de navegação do navio, entende-se que a potência total necessária aumenta devido à aplicação dos lavadores. Observa-se que há um aumento na geração de energia dos Diesel-geradores em aproximadamente 3.7%. Como resultado, foram consumidas 99 toneladas adicionais de combustível decorrente à utilização dos lavadores, durante o mês em que o estudo foi realizado. Este aumento representa um incremento de \$ 54.549 mil dólares devido ao aumento de consumo de energia decorrente da instalação das tecnologias analisadas. O valor utilizado para o cálculo foi o preço médio das bancas de óleo pesado de 20 diferentes portos principais ao redor do mundo (*Ship&Bunker*, 2024).

#### 5.6.2. Cálculo do EEXI

O índice de eficiência energética para navios existentes (EEXI) foi introduzido no ano de 2020 durante a 75ª sessão do Comité de Proteção ao Meio Ambiente Marinho (MEPC 75) da IMO. No entanto, a sua formalização ocorreu somente com a adoção das emendas ao Anexo VI da Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL), por meio da resolução MEPC.328(76), durante a 76ª sessão do MEPC em junho de 2021.

O EEXI é uma medida implementada pela IMO com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito de estufa no setor marítimo. Aplica-se aos navios já em operação, complementando o Índice de Eficiência Energética do Projeto (EEDI), que se aplica a novas construções.



A necessidade de implementar o EEXI surgiu a partir do reconhecimento de que as emissões do setor marítimo contribuem significativamente para o aquecimento global e, com o aumento das preocupações internacionais sobre as mudanças climáticas e a pressão por adotar ações mais rigorosas para controlar as emissões de carbono, a IMO estudou formas de regular não apenas os novos navios, mas também a vasta frota existente. A implementação do EEXI tornou-se, assim, uma medida essencial para garantir que os navios em operação fossem adaptados ou operassem de forma mais eficiente em termos de consumo energético e de emissões.

O EEXI é calculado com base na relação entre as emissões de CO<sub>2</sub> e a capacidade de transporte do navio, conforme indicado na equação 12. Para navios de propulsão Diesel-elétrica, como é o caso do navio em estudo, o cálculo do EEXI envolve a determinação da quantidade de dióxido de carbono emitida pelo navio em condições normais de operação. Leva-se em conta a potência instalada do sistema de propulsão e a eficiência de conversão de energia no sistema Diesel-elétrico, que se distingue dos sistemas de propulsão convencionais devido à conversão da energia mecânica em energia elétrica. A fórmula básica do EEXI inclui fatores como a potência dos motores principais, o fator de correção relacionado com a eficiência do hélice e o consumo específico de combustível, que a seguir se apresenta:

$$EEXI = \frac{\text{Emissão de g/CO}_2}{\text{Efeito do Transporte}} \quad (\text{Eq.12})$$

Os navios que não cumprem os requisitos do EEXI podem necessitar de fazer modificações para melhorar a sua eficiência energética. Essas adaptações podem envolver a redução de potência disponível dos motores, a instalação de tecnologias que aumentem a eficiência do combustível, ou a adoção de práticas operacionais que diminuam o consumo de energia. No contexto do estudo realizado, o cálculo desse índice foi feito para avaliar as ações implementadas pelo armador ao adotar estas medidas de eficiência energética. A regulamentação estipula que os navios devem alcançar um valor de EEXI abaixo de um limite específico, que varia conforme a classe e o tamanho do navio.

O cálculo do EEXI para navios de passageiros com propulsão não convencional é estabelecido pela resolução MEPC. 245(66) e MEPC.333(76) da IMO. Esse cálculo é definido como a quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> por unidade de transporte realizado na velocidade de referência (gCO<sub>2</sub>/t-Nm), conforme é representado na equação 13.

$$EEXI_{\text{attained}} = \frac{(P_{\text{hotel+aux}} + P_{\text{prop}}) \times C_{f_{AE}} \times SFC_{AE}}{GT \times V_{\text{ref}}} \quad (\text{Eq.13})$$



$$EEXI_{required} = \left(1 - \frac{Y}{100}\right) \times a \times b^{-c} \quad (\text{Eq.14})$$

Onde:

- $P_{\text{hotel+aux}}$  = Potência de serviço no mar (com a carga da hotelaria) a  $V_{\text{ref}}$
- $P_{\text{prop.}}$  = Potência dos motores de propulsão com 75% de carga
- $V_{\text{ref}}$  = Velocidade de referência do navio com 75% da potência do motor
- $SFC_{\text{AE}}$  = Consumo específico de combustível dos motores Diesel geradores
- $CF_{\text{AE}}$  = Fator de emissão do combustível
- Capacidade = Arqueação bruta (específico para navios de passageiros)
- a, b & c = Parâmetros para determinação de valores de referência para os diferentes tipos de navios
- Y = Fatores de redução da EEXI em relação à linha de referência da EEDI

Essas fórmulas foram desenvolvidas para criar um padrão uniforme de eficiência energética para navios existentes, incentivando o setor marítimo a reduzir suas emissões e a operar de forma mais sustentável. No presente estudo, o cálculo do EEXI foi realizado em três cenários: o primeiro (situação 0), quando o navio utiliza apenas HFO; o segundo (situação 1), antes da instalação destas medidas, mas ainda sem atingir o EEXI requerido. Nesse último cenário, também foi considerado a redução da potência do navio, evidenciando claramente as grandes diferenças obtidas. Como o objetivo é alcançar um EEXI inferior ao valor requerido, algumas variáveis na fórmula podem ser ajustadas com base nas medidas de eficiência energética, que reduzem o consumo de energia ou diminuem a potência propulsora do navio.

Os detalhes adicionais relativos aos cálculos do  $EEXI_{\text{att}}$  e do  $EEXI_{\text{req}}$  do navio em estudo encontram-se apresentados no Apêndice I. A curva de velocidade de referência utilizada para o cálculo, está incluída no Anexo IV. Os parâmetros utilizados na determinação dos valores de referência constam no Anexo V, enquanto os fatores de redução EEXI relativamente ao EEDI, para os diversos tipos de navios, encontram-se no anexo VI.

De acordo com os cálculos realizados, foi determinado um  $EEXI_{\text{att}}$  de 10.95, enquanto o  $EEXI_{\text{req}}$  foi de 10.13. Isso indica que o navio em questão necessita de melhorar a sua eficiência energética, o que justifica as medidas adotadas pelo armador, como a implementação de várias estratégias de melhoria de eficiência energética e de medidas para melhorar a eficiência do combustível, com a instalação do FID. A seção 5.7 aborda detalhes sobre os custos e a análise destes investimentos. O cálculo completo do EEXI, bem com todas as variáveis utilizadas, encontra-se no Apêndice I.

### 5.6.3. Considerações acerca do CII

Tal como o EEXI, o índice de intensidade de carbono (CII) foi estabelecido pela IMO com o objetivo de avaliar e regular a eficiência energética dos navios em termos de emissões de carbono por unidade de trabalho realizado. Por outras palavras, o EEXI foca-se na eficiência energética no navio como um todo, baseado no seu projeto e nas suas modificações estruturais,



enquanto o CII se concentra na eficiência operacional do navio, avaliando continuamente o seu desempenho durante as operações, sendo um indicador essencial para monitorar e reduzir efetivamente a pegada de carbono no setor marítimo.

O CII está regulamentado em diversas resoluções e normas. Para além da resolução MEPC.328(76), que instituiu tanto o EEXI quanto o CII como parte do plano estratégico da IMO para reduzir as emissões de gases de efeito de estufa no setor marítimo, as resoluções MEPC.336(76), MEPC.337(76), MEPC.338(76) e MEPC.339(76), também são usadas como normas para o cálculo do  $CII_{att}$ ,  $CII_{ref}$  e  $CII_{req}$ .

O  $CII_{att}$  refere-se ao valor que indica a eficiência real do navio, enquanto o  $CII_{ref}$  é o valor de referência estabelecido pela IMO, que serve como base para avaliar o desempenho de um navio em termos de emissões de CO<sub>2</sub>. O  $CII_{req}$ , por sua vez, é o valor exigido e que representa o limite máximo que um navio deve alcançar ou superar para estar em conformidade com as normas de eficiência energética. A comparação entre o  $CII_{att}$  e os valores de referência e requeridos serve para verificar se o navio está dentro dos padrões estabelecidos ou se necessita de efetuar melhorias para reduzir as suas emissões.

O cálculo do CII é representado pela seguinte fórmula:

$$CII_{attained} = \frac{\text{Emissões de CO}_2 \text{ [gramas]}}{\text{Capacidade de transporte [tons]} \times \text{Distância Percorrida [NM]}} \quad (\text{Eq.15})$$

Conforme mencionado anteriormente, esse índice possibilita a classificação dos navios em categorias que vão de “A” (mais eficientes) a “E” (menos eficientes), proporcionando uma métrica padronizada que reflete o desempenho energético do navio relativamente ao transporte de carga. Isso permite efetuar uma avaliação contínua do desempenho energético, facilitando a sua constante melhoria.

O cálculo do CII requerido e do CII referência são expressos pelas equações a seguir:

$$CII_{ref} = a \times \text{Capacidade}^{-c} \quad (\text{Eq.16})$$

$$CII_{req} = \left(1 - \frac{Z}{100}\right) \times CII_{ref} \quad (\text{Eq.17})$$

Onde:

- a & c = Parâmetros tabelados referentes às linhas de referência de acordo com o tipo de navio.
- Z = Fator de referência do CII, referente ao ano do cálculo. [%]

Os parâmetros ‘a’ e ‘c’ são valores tabelados utilizados para definir as linhas de referência do CII, variando conforme o tipo de navio. Por sua vez, o fator de referência, expresso em percentual [%], ajusta-se de acordo com o ano do cálculo e reflete a progressiva redução das emissões exigida ao longo do tempo, tornando os padrões mais rigorosos a cada ano. Esses



## ESCOLA SUPERIOR NÁUTICA INFANTE D. HENRIQUE

parâmetros, assim como os fatores de referência utilizados para o cálculo, estão representados no Anexo VII e VIII, respetivamente.

Foi realizado o cálculo do CII para o navio em estudo, referente ao ano de 2024, com parte das tecnologias de eficiência energética já instaladas e em funcionamento, até ao ano de 2022, antes da implementação de quaisquer medidas de eficiência energética. A tabela 26 apresenta a diferença do CII antes, durante e após a instalação das medidas de eficiência energética.

Índice	Ano		
	2022	2023	2024
CII attained	11.4	10.9	10.2
CII reference	11.2	11.2	11.2
CII required	11.215	11.209	11.204

**Tabela 26.** Cálculo do CII do Navio em Estudo.

Ao analisar os índices apresentados, nota-se uma tendência de melhoria na eficiência energética do navio ao longo dos anos. Em 2022, o  $CII_{att}$  foi de 11.4, ligeiramente superior ao  $CII_{ref}$  de 11.2 e ao  $CII_{req}$  de 11.215, o que indica que o navio operava acima dos padrões exigidos, com uma eficiência energética aquém do ideal. Em 2023, o  $CII_{att}$  melhorou para 10.9, situando-se bem abaixo tanto do  $CII_{ref}$  como do  $CII_{req}$ , demonstrando uma significativa melhoria na eficiência energética do navio. Em 2024, o  $CII_{att}$  continuou a melhorar, atingindo 10.2, mantendo-se consideravelmente inferior ao  $CII_{ref}$  e ao  $CII_{req}$ , confirmando que o navio não apenas alcançou como superou com folga os requisitos estabelecidos para a eficiência energética. Essa trajetória revela uma melhoria contínua e eficaz na gestão do consumo de combustível e das emissões de  $CO_2$  do navio. Durante estes anos, o navio atinge a categoria “C” (desempenho padrão) em referência ao seu desempenho energético, porém, como as referências se tornarão cada vez mais rigorosas, prevê-se o que o navio atinja a categoria “D” (abaixo do padrão) apenas em 2030, o que representa que na altura, o navio vai precisar melhorar seu desempenho energético para evitar sanções e cumprir as metas regulatórias.

O cálculo completo do CII, bem com todas as variáveis utilizadas, encontra-se no Apêndice II.

A tabela 27 representa o impacto de algumas das medidas de eficiência energética no cálculo do CII. A implementação dessas medidas resulta claramente num perfil operacional mais sustentável e económico, para além de permitir o cumprimento das metas regulatórias, prolongando a vida útil do navio.



Item	2023 (%)	2024 (%)	2025 (%)
Variadores de Frequência Sistema SW	2.8	3.7	3.7
Ventilação Controlada pela Procura	0.0	0.0	0.5
Melhoria da Ventilação da Casa de Máquinas	0.0	0.0	2.4
Iluminação LED	0.2	1.9	1.9
Melhoria da Pintura do casco	1.6	1.9	0.0
VFD's para “chillers” de AC	0.0	0.0	0.9

**Tabela 27.** Quantificação do Impacto das Medidas de Eficiência Energética no Navio em Estudo.

### 5.7. Viabilidade Financeira do Projeto

Para atingir as metas ambiciosas de descarbonização na indústria marítima, é fundamental adotar não apenas métodos de redução de emissões poluentes, mas também implementar medidas de eficiência energética para operações mais sustentáveis. A análise financeira conduzida neste estudo considera um projeto de instalação de três elementos essenciais para garantir a conformidade com as regulamentações de emissões de gases poluentes: medidas de melhoria de eficiência energética, torres de lavagem e captura e armazenamento de carbono (CCS). Na avaliação da viabilidade financeira desta adaptação, todos os custos associados foram cuidadosamente efetuados, incluindo, no caso das torres de lavagem, o seu impacto adicional no consumo de combustível.

O navio em estudo implementou várias das medidas apresentadas na tabela 27 para melhorar a sua eficiência energética, porém algumas delas ainda estão em processo de instalação. Os custos de capital (CAPEX) associados à instalação das torres de lavagem estão representados na tabela 28.

A tabela 29 apresenta um resumo do valor de CAPEX necessário para a instalação das diversas medidas de eficiência energética no navio em estudo, bem como a consequente economia de combustível projetada com a instalação desses elementos. Adicionalmente, são detalhados os custos de instalação das torres de lavagem de circuito aberto nos seis Diesel geradores. Para a análise, os custos do VLSFO e do HFO foram fixados em USD 688,50 e USD 431,50, respetivamente. No que diz respeito à instalação dos equipamentos necessários para a captura e armazenamento de carbono, os valores de CAPEX foram obtidos a partir da estimativa de CAPEX para a instalação destes equipamentos num navio VLCC, previamente representado na tabela 26.



CAPEX Torres de lavagem - Motor 11.4 MW		
Materiais e construção	€	10,000.00
Componentes e Instrumentação	€	196,738.33
Gestão de Projetos e Engenharia	€	20,000.00
Supervisão e Custos Relacionados	€	14,400.00
Transporte/Embalagem e Testes	€	5,000.00
Licença	€	30,000.00
Acordo 30%	€	36,921.00
<b>Custo Final</b>	<b>€</b>	<b>313,059.33</b>

CAPEX Torres de lavagem - Motor 8.6 MW		
Materiais e construção	€	10,000.00
Componentes e Instrumentação	€	192,558.33
Gestão de Projetos e Engenharia	€	20,000.00
Supervisão e Custos Relacionados	€	14,400.00
Transporte/Embalagem e Testes	€	5,000.00
Licença	€	30,000.00
Acordo 30%	€	36,294.00
<b>Custo Final</b>	<b>€</b>	<b>308,252.33</b>

**Tabela 28.** CAPEX da Instalação das Torres de Lavagem no Navio em Estudo.

Item	Total CAPEX [\$]	Economia de Combustível esperada [ton/ano]	Economia de Recursos [\$/ano]
Torres de lavagem	2,026,220.87	N/A	6,192,854.52
Captura de Carbono	5,400,000.00	N/A	698,116.61
Variadores de Frequência Sistema SW	150,000.00	372.00	186,000.00
Ventilação Controlada pela Procura	2,053,597.00	177.00	88,500.00
Osrose Inversa de Alta Eficiência	1,247,900.00	1770.00	885,000.00
Iluminação LED	101,336.00	708.00	354,000.00

**Tabela 29.** CAPEX da Implementação de Tecnologias de Eficiência Energética e das Torres de Lavagem.



Observa-se que o custo inicial para instalar essas tecnologias é considerável. Para o navio em causa, o investimento total foi de \$1,8 milhões para a instalação das torres de lavagem nos seis Diesel geradores e de \$2,2 milhões para a implementação de variadores de frequência no sistema de arrefecimento de água salgada e na ventilação.

Os variadores de frequência permitem regular a velocidade dos motores elétricos conforme a procura, o que pode resultar numa economia significativa de energia a longo prazo. Apesar do custo inicial ser considerável, a redução nos custos operacionais ao longo do tempo pode compensar rapidamente esse investimento.

Para proceder à análise do lucro, foram utilizadas diversas métricas financeiras, tais como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR), o Período de Retorno do Investimento (PBP), Retorno sobre o Investimento (ROI) e Índice de Rentabilidade do Projeto (IRP). Estas métricas foram calculadas para um horizonte temporal de 10 anos, correspondente ao período restante de vida útil estimada do navio, utilizando taxas de desconto de 8%, 10% e 12%. Os resultados dos cálculos do VPL e do PBP para cada opção, estão sintetizados na tabela 30, enquanto os fluxos de caixa projetados e os períodos de retorno baseados numa taxa de desconto de 10% estão representados na figura 23.



Indicador	Medidas de Eficiência Energética	Torres de Lavagem	CCS
Valor Presente Líquido (VPL 8% ; \$)	5,927,841.01	38,800,783.06	-259,341.18
Valor Presente Líquido (VPL 10% ; \$)	5,128,825.86	37,492,507.05	-942,404.84
Valor Presente Líquido (VPL 12% ; \$)	4,430,367.12	32,352,151.62	-1,489,093.02
Retorno sobre o Investimento (IRR) (%)	298	2903	-3
Taxa Interna de Retorno (TIR) (%)	38	300	-1
Índice de Rentabilidade do Projeto (IRP 8%)	2.67	1.05	0.95
Índice de Rentabilidade do Projeto (IRP 10%)	2.44	1.05	0.83
Índice de Rentabilidade do Projeto (IRP 12%)	2.25	1.06	0.72
Período de Retorno do Investimento	2.51	0.15	10.3

**Tabela 30.** Análise Comparativa dos Indicadores Financeiros com Taxas de Desconto de 8%, 10% e 12%.



**Figura 23.** Fluxo de Caixa e Período de Retorno de Investimento dos Projetos em Análise.

As medidas de melhoria da eficiência energética apresentam-se como uma estratégia altamente eficiente, com um VPL de \$5.128.825,86 para a taxa de desconto de 10%, demonstrando que os investimentos iniciais não apenas são recuperados, como também geram um fluxo de caixa adicional significativo ao longo do tempo. A TIR de 38% e o IRP de 2,44 corroboram a viabilidade financeira destas medidas, com um período de retorno de investimento de 2,49 anos, o que é favorável, considerando a vida útil residual de 10 anos do navio.

As torres de lavagem surgem como componente com maior rentabilidade do projeto, alcançando um VPL de \$37.492.507,05. Com uma TIR impressionante de 300% e um IRP de 1,05, estas tecnologias oferecem um retorno financeiro substancial. O período de retorno do investimento é extremamente curto, estimado em 0,15 anos, permitindo uma recuperação quase imediata do capital investido. Esta rentabilidade extraordinária decorre, em grande parte, da significativa diferença de custos entre os combustíveis HFO e o MGO, combustível que seria utilizado na ausência de equipamentos de redução de emissão de enxofre. Contudo, é importante notar que a viabilidade financeira das torres de lavagem está diretamente relacionada com a persistência desta diferença de preços.



Em contrapartida, a instalação do CCS apresenta desafios consideráveis. Foram analisados dois cenários para a instalação desta tecnologia: um em 2030 e outro em 2050. A implementação imediata da tecnologia foi descartada devido ao valor aplicado no sistema de comércio de emissões, que atualmente resulta num custo mais baixo para a empresa em comparação com os custos operacionais do CCS, conforme representado na tabela 31. No cenário da instalação no ano de 2030, o VPL projetado de  $-\$4.657.067,47$  indica que o CCS não é viável financeiramente, com uma TIR negativa de  $-21\%$  e um IRP de  $0,14$ . O período de retorno do investimento é prolongado, estimado em  $61,3$  anos. Já o cenário da instalação em 2050, embora o VPL continue negativo em  $-\$942.404,84$  para uma taxa de desconto de  $10\%$ , o período de retorno do investimento é mais curto, estimado em  $10,3$  anos. Contudo, mesmo neste caso, a instalação do CCS não se justifica financeiramente, dado que a vida útil remanescente do navio é de apenas  $10$  anos, e a instalação seria realizada em 2024.

Portanto, a análise conclui que a instalação do CCS no navio em estudo não é viável para os cenários considerados, mesmo quando se tem em conta o aumento esperado no custo do comércio de carbono.

Item [\$/ton]	CCS	EU ETS [\$/Ton]	Custo ETS
CAPEX (\$)	540.00		
OPEX (\$)	70.00		
2024 (\$)		50.00	436.322.88
2030 (\$)		150.00	1.308.968.64
2050 (\$)		200.00	1.745.291.52
<b>Custo</b>	<b>\$ 610,852.03</b>		

**Tabela 31.** Análise Comparativa dos Custos de Instalação da Tecnologia CCS com a Estimativa de Valores Previstas para o Sistema de Comércio de Emissões de Poluentes EU-ETS.

Em paralelo, a opção por uma instalação nova a LNG, em comparação com a instalação das torres de lavagem, requer uma análise mais detalhada. Embora a propulsão com LNG reduza certas emissões, ainda resulta em emissões de carbono, exigindo o pagamento por estas emissões no sistema de comércio de emissões ou levar à instalação do CCS, o que, como já foi analisado previamente, não é economicamente viável para o navio em estudo. A análise de viabilidade da adaptação do navio ao combustível LNG, com um VPL de  $-\$27.903.719,49$  e um período de retorno de investimento de  $87,9$  anos, o que torna inviável esta alternativa. Para além disso, a troca de HFO por LNG resultaria num aumento significativo nos custos operacionais anuais (FuelEx), com um adicional de  $\$2.574.462,02$ , conforme calculado com base no consumo energético do navio estudado.

Neste estudo, foi realizada um levantamento do consumo de combustível nos cenários apresentados, bem como estimativas do preço dos combustíveis para os próximos anos. Em



conclusão, neste caso específico, é indicado que o LNG como combustível marítimo possui um retorno de investimento numa instalação recém construída que varia de um a dois anos, o que não se verifica para o caso de uma adaptação.

É evidente que a idade do navio deve ser considerada (não faz sentido instalar torres de lavagem num navio muito antigo), assim como o diferencial futuro de preços entre o LSFO e o HFO, deve ser tido em consideração.

Observa-se que a diferença de preço é crucial, pois as economias potenciais (isto é, as economias obtidas através da instalação de uma torre de lavagem e da queima de HFO em vez de LSFO) podem ser usados para compensar o custo de instalação do lavador. Se a discrepância entre o preço do LSFO e do HFO for substancial, o período de retorno relativo ao custo de instalação do lavador é relativamente curto. À medida que a diferença de preços diminui, o período de retorno aumenta.

Em conclusão, a instalação conjunta das torres de lavagem, medidas de eficiência energética, excluindo-se o CCS, deve ser vista com uma abordagem integrada, que assegura não apenas a conformidade regulatória, mas também otimiza a viabilidade financeira do projeto. Esta combinação de tecnologias é crucial para cumprir as exigências ambientais, ao mesmo tempo que maximiza os retornos financeiros, garantindo a sustentabilidade a longo prazo do projeto. Por fim, considerando a vida útil remanescente do navio, torna-se claro por que razão os armadores tendem a preferir a adaptação das torres de lavagem em vez da instalação de um sistema completo de LNG. As medidas de eficiência energética, além de seus benefícios financeiros, também contribuem para a redução do consumo de combustível e, conseqüentemente, para a diminuição das emissões de carbono.

Para além das análises realizadas, no navio em estudo, a tripulação do navio em estudo fez um esforço adicional para acelerar o projeto de instalação dos VFDs e, para além dos já instalados, realizar a manutenção necessária para maximizar a sua operação, minimizando assim os períodos de inatividade, o que proporcionou ao armador uma economia considerável. Assim, num total de 64 variadores instalados, sete apresentaram problemas e foram reparados pela equipa de oficiais eletrotécnicos do navio. Cada VFD fora de serviço resulta num consumo extra de 9 toneladas de combustível, o que implica aproximadamente \$7.300 dólares adicionais por mês e quase \$90.000 dólares extras por ano. Considerando os sete variadores que estavam fora de serviço, o impacto no consumo de combustível ultrapassa os \$600.000 dólares anuais.

Neste caso específico, os variadores defeituosos foram reparados pela tripulação, gerando uma economia de \$44.300 dólares, visto que o custo de aquisição e substituição de cada VFD varia entre \$5.000 a \$8.000 dólares, enquanto que o custo de compra das peças necessárias para reparação dos sete variadores foi de apenas \$436 dólares.

Relativamente à instalação de iluminação LED, com um investimento relativamente baixo de \$100 mil, pode gerar uma economia de combustível de 708 toneladas por ano, representando



uma economia de aproximadamente 380 mil dólares anuais, mostrando-se assim como outra decisão acertada do armador.

Portanto, através da análise de viabilidade financeira apresentada, foi observado, na prática, que a instalação de torres de lavagem é mais económica, resultando numa redução no período de retorno do investimento.

Um exemplo elucidativo da empresa Pacific Green Marine Technologies demonstra que o custo para converter um navio porta-contentores existente de 8.500 TEUs para LNG seria de 28 milhões de dólares, em comparação com 13 milhões de dólares que seriam gastos na construção de um navio novo de tamanho equivalente.

Utilizando uma comparação semelhante para navios VLCCs, o custo de instalação de um lavador de circuito aberto num navio recém-construído situa-se em torno de US\$ 2,5 a US\$ 3,0 milhões, enquanto que o custo de modernização e instalação das torres de lavagem num VLCC existente seria de US\$ 4 a US\$ 4,5 milhões.

Antecipa-se também que os novos navios operem de forma mais eficiente, o que contribuirá ainda mais para a redução de custo relativo de instalação de um lavador ou sistema de LNG numa construção nova.

No entanto, é relevante destacar que a instalação de uma torre de lavagem é consideravelmente mais económica do que a implementação de uma unidade de LNG no cenário de uma nova construção mais rentável. É razoável inferir, portanto, que essa economia de custos é ampliada em “retrofits”, onde os custos de instalação são mais elevados, constituindo um robusto argumento comercial para a implementação de lavadores em navios já em operação.

Dado que os “scrubbers” são mais acessíveis para instalar quando comparados com um sistema de propulsão totalmente novo, os períodos de retorno são até três vezes mais rápidos do que os do LNG, sendo inversamente proporcionais ao tamanho do navio. Para navios de grande porte, o tempo de retorno de uma instalação de lavadores pode ser inferior a um ano. Estes dados são comprovados pela análise de viabilidade financeira apresentada neste estudo.

Isto é especialmente relevante para adaptações, uma vez que o benefício máximo do preço do combustível é alcançado imediatamente após a instalação das torres de lavagem. Contudo, uma vez instalado, o navio pode continuar a queimar o óleo combustível pesado que é mais económico, e as economias obtidas irão, ao longo do tempo, compensar o investimento inicial realizado.

Para além das adaptações às torres de lavagem, devemos considerar também uma segunda opção que, embora possa parecer um tanto extravagante, surge como uma das alternativas mais viáveis, apesar do alto custo envolvido. Essa alternativa consiste na adaptação de navios já existentes para propulsão LNG através do alongamento do navio. Esta abordagem consiste em



adicionar ao navio uma seção pré-fabricada, contendo os tanques LNG e todos os sistemas auxiliares necessários.

A seguir, apresentam-se de forma comparativa o CAPEX final, resultante de vários casos de estudo referentes a navios de diferentes tamanhos e com operações distintas, para a adaptação desses navios a LNG por alongamento, em comparação a instalação de torres de lavagem.

Embora seja um projeto bastante dispendioso, não é inédito. Um exemplo é o navio de passageiros do grupo Royal Caribbean MS *Enchantment of the Seas*, que em 2005, teve um aumento de uma seção de 22 metros ao seu comprimento. A conversão foi realizada durante um mês.

Um estudo desenvolvido pelo professor Doutor Boulougouris E. da universidade Strathclyde de Glasgow detalha o conceito do alongamento, as considerações técnicas, benefícios e desafios do projeto e os custos envolvidos, em comparação com a adaptação do mesmo navio às torres de lavagem. Os dados deste estudo estão apresentados na tabela 32.

O resultado da análise financeira do estudo abrange o âmbito necessário para realizar a conversão para propulsão LNG de um navio porta-contentores de 14000TEUs também por meio de alongamento. Esse projeto foi idealizado no âmbito do programa de desenvolvimento conjunto entre GTT, Alwena Shipping e CHI Zhoushan, com a supervisão do projeto pela sociedade classificadora Bureau Veritas.

A iniciativa público-privada dinamarquesa *Green Ship of the Future* (GSF) desenvolveu um estudo comparativo das soluções capazes de cumprir com as regulamentações da IMO. Nesse estudo, um navio foi disponibilizado por um de seus membros para servir como navio de referência. O navio escolhido foi o MS Nord Butterfly, um navio-tanque de 38500 dwt, que também foi submetido para comparação entre a sua adaptação à propulsão a LNG ou às torres de lavagem.

Em todos os estudos apresentados, é possível perceber a magnitude da variação econômica que um projeto desse porte pode acarretar, quando se trata da adaptação a LNG por alongamento. Um exemplo é o estudo da universidade de Strathclyde Glasgow, que apresenta um valor irreal de 74 milhões de dólares, para um navio de passageiros, em comparação com os 41 milhões de dólares de CAPEX de um navio porta-contentores, o que pode apresentar uma dificuldade para vários armadores de menor dimensão.

É importante salientar que os dados referentes ao CAPEX apresentados nas tabelas abaixo são apenas estimativas e não passam por uma avaliação mais aprofundada neste estudo. Para uma análise mais precisa, cada empresa é responsável por realizar o levantamento da instalação necessária para os seus navios, além de solicitar um estudo de viabilidade do investimento com o objetivo de calcular o retorno do investimento para cada caso específico.



Ademais, é viável adaptar um navio para propulsão LNG através de instalação de tanques no convés e modificações de tubagens e dos motores já existentes no navio, o que pode tornar os números mais realistas. Um exemplo é o estudo da GSF com o navio referencia MS Nord Butterfly, que teve o CAPEX calculado em 7.6 milhões de dólares. Contudo, é necessário lembrar que o custo varia com diversas decisões tomadas durante o projeto e, principalmente, com o tamanho e a potência propulsora do navio a ser modificado.

Para completar a análise comparativa entre instalações LNG e torres de lavagem, a tabela 34 apresenta o CAPEX de uma nova construção de um navio porta-contentores de 14000TEUs idealizado e desenvolvido pela organização SEA-LNG. Este estudo compara dois motores LNG, uma instalação de alta pressão e outra de baixa pressão, relativamente à instalação de torres de lavagem e à propulsão convencional.

Uma pesquisa do *Oxford Institute of Energy Studies* revela que o expressivo investimento de capital na modernização tem desencorajado, em grande parte, os armadores a modernizarem os navios existentes com lavadores ou propulsão a LNG. Isso ocorre apesar de opções já disponíveis, como a adaptação de navios de cruzeiro para LNG por alongamento, e a infraestrutura de abastecimento, inesperadamente, ter sido rapidamente otimizada num curto período de tempo.

Para estes armadores cautelosos em relação ao capital, a conversão para LNG pode representar um passo ousado, exigindo confiança na ampla adoção do LNG como combustível marítimo, infraestruturas de abastecimento altamente desenvolvidas e uma diferença de preços persistentemente significativa entre o LNG e o HFO.

Para um operador nessas circunstâncias, parece que a adoção precoce de uma solução de torre de lavagem, especialmente como “*retrofit*”, não é apenas a opção mais económica, mas pode ser a única viável, especialmente se considerar navios com um tempo de vida útil mais curto.

**Estimativa de adaptação de um navio de passageiros de 75000GT para LNG por alongamento [M\$]**

Engenharia	7
Material e Alongamento	7
Máquinas Auxiliares	31
Tanques LNG e sistemas auxiliares	8
4 x Motores MAN 12V51/60 DF de 11400kW	21
<b>Custo</b>	<b>74</b>

**Estimativa de adaptação de um navio de passageiros de 75000GT para torre de lavagem [M\$]**

Estaleiro	5
Máquinas e equipamentos auxiliares	15
<b>Custo</b>	<b>20</b>

**Tabela 32.** Comparação de CAPEX para Adaptação de Navios a LNG e as Torres de Lavagem

Fonte: Boulougouris, E., N/A. *LNG Fuelled Vessels design Training: case study about new-building and retrofitting LNG Fuelled Vessels.*

**Estimativa adaptação do navio-tanque de 38500dwt MS Nord Butterfly para consumir LNG**

Tanques LNG, equipamentos auxiliares e conversão do motor principal	4.4
Material (aço - 300t)	2
Projeto e custos com a classificação	0.5
Custo do tempo de inatividade (40 dias)	0.7
<b>Custo</b>	<b>7.6</b>

**Estimativa de adaptação do navio-tanque de 38500 dwt MS Nord Butterfly para instalação de torres de lavagem**

Torre de Lavagem e sistemas auxiliares	2.6
Material (aço - 150t), tubagens e modificações	2.4
Projeto e custos com a classificação	0.5
Custo do tempo de inatividade (20 dias)	0.34
<b>Custo</b>	<b>5.8</b>

**Tabela 33.** Comparação de CAPEX para adaptação do Navio MS Nord Butterfly para consumo de LNG e para instalação de torres de lavagem.



Fonte: *Green Ship of the Future Technical Report*, 2012

**Estimativa adaptação navio porta-contentores a LNG 14000TEUs para 15000TEUs por alongamento [M\$] [1]**

Alongamento e Instalação dos tanques LNG	17
Instalação do motor principal MANB&W 11S90ME-C10.5 GILPSCR Tier III + 1x Geradores 3MW + 1x5MW	13
Projeto	0.8
Outros serviços	10.2
<b>Custo</b>	<b>41</b>

**Nova construção de navio porta- contentores 14000 TEUs [M\$] [2]**

	Opção 1 HP. Motor MAN ME-GI 2	Opção 2 LP. Motor WinGD 9X- 92DF	Torre de Lavagem de Circuito Aberto	Propulsão Convencional
Estaleiro	4.2	4.2	8.6	-
Permutador de calor <i>Chiller</i>	-	-	-	0.118
Fornecimento de gás a alta pressão (HP)	1.2	-	-	-
Fornecimento de gás a baixa pressão (LP)	0.7	0.7	-	-
Tanques LNG e/ou sistemas auxiliares	9.7	9.7	2.7	2.7
Motor principal	15.4	15.4	12.3	12.3
SCR	2.5	-	3.2	3.2
<b>Custo</b>	<b>33.7</b>	<b>30</b>	<b>26.8</b>	<b>18.3</b>

**Tabela 34.** Estimativa de CAPEX para adaptação para LNG por Alongamento Comparativamente com uma Nova Construção.

Fonte: [1] ATMA, 2022; [2] SEA-LNG, 2022.



## 6. CONCLUSÃO

No decorrer deste estudo, examinou-se a importância crucial da implementação de medidas de eficiência energética e da transição para combustíveis alternativos no setor marítimo, com o intuito de alcançar a descarbonização e a sustentabilidade. Foram analisadas as opções mais viáveis, a sua disponibilidade nos próximos anos e a vulnerabilidade de cada alternativa.

De facto, a introdução do plano SEEMP, bem como dos Índices de Eficiência Energética contribuíram significativamente para que os armadores concebessem e estabelecessem rotas bem estruturadas, visando a melhoria da eficiência das suas operações de modo geral. O aperfeiçoamento no uso dos recursos disponíveis é o objetivo principal, resultando na redução do consumo de combustível e na redução de emissões poluentes. Assim, a recolha e verificação dos dados de consumo, seguidas pelo cálculo do Índice de Intensidade de Carbono representaram nos anos de 2023 e 2024 mudanças significativas para todo o setor marítimo, consolidando a transição para uma indústria com menor pegada ambiental.

A perceção das medidas a serem implementadas é vital, assim como o rápido desenvolvimento do uso de combustíveis alternativos. Definitivamente, a indústria está a desenvolver-se a passos largos.

A seleção do combustível alternativo mais adequado para navios, ou a adaptações de navios existentes, constitui um aspeto complexo que procura fazer uma análise aprofundada de fatores técnicos, económicos e ambientais. O gás natural liquefeito (LNG) surgiu como uma opção de transição atrativa, em virtude da sua capacidade de reduzir significativamente as emissões de CO<sub>2</sub> em comparação com os combustíveis fósseis tradicionais, e pela sua imediata disponibilidade no mercado, com infraestrutura madura e pronta para cumprir com as necessidades dos armadores. Não obstante, é importante considerar as emissões de metano associadas à sua cadeia de produção e transporte, as quais podem comprometer os benefícios ambientais esperados. Ainda assim, o LNG cumpre eficazmente seu papel na transição para uma indústria sustentável, sendo que a sua adaptação para outro gás como o amoníaco, não constitui uma tarefa difícil, o que é evidenciado pelos navios a LNG com notação de classe da DNV “*Ammonia ready*”.

As células de combustível, particularmente as que utilizam hidrogénio, apresentam uma solução de longo prazo promissora, dado que proporcionam emissões zero durante a sua operação. Contudo, essa tecnologia enfrenta desafios consideráveis, relacionados com a infraestrutura necessária para o abastecimento de hidrogénio e os elevados custos de produção do hidrogénio verde, que atualmente dependem de fontes renováveis de energia que estão ainda em desenvolvimento.

O amoníaco surge como outra alternativa potencialmente viável, destacando-se por não emitir CO<sub>2</sub> durante a combustão. Todavia, a sua utilização é limitada pela alta toxicidade e pelos desafios associados à segurança no manuseamento e armazenamento. O metanol, por sua vez, apresenta-se como uma solução mais prática e economicamente viável no presente momento,



especialmente quando produzido a partir de fontes renováveis. A sua implementação exige menores adaptações nos navios existentes, tornando-o uma opção atrativa a curto e médio prazo.

A viabilidade económica e a eficiência técnica de cada alternativa devem ser meticolosamente avaliadas. Por exemplo, a instalação de variadores de frequência e iluminação LED demonstrou ter uma relação custo-benefício bastante positiva, com um retorno de investimento relativamente rápido devido às significativas economias de combustível proporcionadas.

Nesse estudo, a análise detalhada da instalação das torres de lavagem revelou alguns aspetos adversos da sua aplicação. Observou-se um aumento no consumo energético do navio resultando num maior consumo de combustível pelos Diesel geradores. Embora o consumo do óleo combustível pesado (HFO) tenha aumentado, houve uma redução nas despesas operacionais devido ao menor custo deste combustível. No entanto, observou-se um incremento nas emissões de gases, com exceção do SO<sub>x</sub>.

A avaliação financeira do investimento indicou que, apesar do alto custo inicial, a instalação das torres de lavagem pode trazer um impacto económico bastante positivo a longo prazo. Contudo, essa solução contraria as metas de emissão zero estabelecidas pela IMO, pois aborda parcialmente o problema das emissões. Portanto, é recomendável associar a instalação das torres de lavagem a outros equipamentos, como soluções de captura e armazenamento de carbono e redução catalítica seletiva, embora o CCS não tenha mostrado ser economicamente viável para navios adaptados, conforme a análise financeira realizada. Nesse contexto, é necessário considerar o impacto económico das emissões de CO<sub>2</sub>, conforme os preços estabelecidos pelo comércio de emissões poluentes. Assim, apesar de a instalação das torres de lavagem ser uma opção economicamente vantajosa para navios com menos de dez anos de vida útil restante, é essencial avaliar alternativas como combustíveis alternativos e tecnologias de tratamento dos gases de evacuação mais eficazes.

A colaboração entre diversos setores da indústria e o apoio governamental também são essenciais para facilitar a transição para uma indústria marítima descarbonizada. O investimento contínuo em pesquisa e desenvolvimento é fundamental para a implementação de soluções inovadoras e sustentáveis. As parcerias público-privadas têm-se mostrado eficazes na promoção de novas tecnologias e na criação de infraestruturas necessárias para suportar essa transição.

Adicionalmente, as decisões sobre a adoção de tecnologias específicas devem considerar a idade dos navios, os custos de adaptação e a infraestrutura disponível. A adaptação de navios existentes para propulsão LNG ou outras tecnologias emergentes, como as células de combustível e outros combustíveis alternativos, pode ser uma estratégia viável e economicamente sustentável, especialmente quando comparada com a construção de navios novos.



Um aspeto bastante relevante relacionado com todas as alterações que a indústria marítima enfrenta é o treino da tripulação para estas novas realidades, tanto no que diz respeito às novas regulamentações quanto às novas tecnologias que estão a ser rapidamente introduzidas. Nota-se uma certa resistência entre profissionais com longa experiência na profissão, que ainda não aceitam a iminência dessas mudanças. A rápida evolução tecnológica exige uma adaptação igualmente célere daqueles que são os responsáveis finais pela operação final da instalação. Portanto, para além dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento, todos os órgãos responsáveis, os setores da indústria, juntamente com os governos devem preocupar-se com a requalificação dos tripulantes sobre as novas tecnologias emergentes.

Em conclusão, a transição para combustíveis alternativos, combinada com a implementação de medidas operacionais e tecnológicas de eficiência energética, aliada ao treino adequado das tripulações dos navios são aspetos vitais para reduzir as emissões de gases de efeito de estufa no transporte marítimo e alcançar a completa descarbonização até 2050. O futuro da navegação sustentável dependerá da capacidade da indústria em se adaptar às regulamentações em constante evolução, de investir em tecnologias inovadoras e de promover uma abordagem integrada que abranja todos os aspetos das operações marítimas. O desenvolvimento contínuo de políticas internacionais e o incentivo à pesquisa e desenvolvimento serão determinantes para assegurar que o setor marítimo contribua positivamente para os objetivos globais de sustentabilidade e mitigação das alterações climáticas.





## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Bureau of Shipping. (2020). *Setting the Course to Low carbon Shipping: Pathways to Sustainable Shipping*. Disponível em: [https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/ABS\\_2020\\_Pathways-to-sustainable-shipping-report.pdf](https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/ABS_2020_Pathways-to-sustainable-shipping-report.pdf). [Acedido em 14 de Janeiro de 2024].

American Bureau of Shipping. (2021). *Hydrogen as Marine Fuel*. Sustainability White paper. Disponível em: <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/publications/whitepapers/hydrogen-as-marine-fuel-whitepaper-21111.pdf>. [Acedido em 22 de Janeiro de 2024].

Ammar, N., & Seddiek, I. (2017). Eco-Environmental Analysis of Ship Emission Control Methods: Case Study RO-RO Cargo Vessel. *Ocean Engineering*. Vol. 137, 2017, Pg. 166–173. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.03.052> [Acedido em 10 de Dezembro de 2023].

Anderson, K., & Salazar, C. (2015). Methanol as a marine fuel report. *FC Business Inteligency Energy. Methanol Institute*. 2015, Pg.32-34. Disponível em: <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2018/03/FCBI-Methanol-Marine-Fuel-Report-Final-English.pdf>. [Acedido em 19 de Janeiro de 2024].

Andersson, K., Jeong, B., & Jang, H. (2020). Life Cycle and Cost Assessment of a Marine Scrubber Installation. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*. Vol. 4, 2020, Pg. 162-176,. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/25725084.2020.1861823> [Acedido em 22 de Dezembro de 2023].

Atoufi, M., & Jenkins, J. D. (2024). *Emerging clean technologies: Policy-driven cost reductions, implications and perspectives*. *Joule*, Vol. 8(1), 1–23. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.12.005> [Acedido em 20 de Agosto de 2024].

Bartellone, A. (2021). "Fit for 55" FuelsEuropes's contribution to the databate on decarbonization of transport. *Fuels Europe - Position paper*. Pg. 16-19. Disponível em: <https://www.fuelseurope.eu/publications/publications/fit-for-55-fuelseuropes-contribution-to-the-debate-on-decarbonisation-of-transport>. [Acedido em 16 de Janeiro de 2024].

Beard, T., Rident C., Priftis, A., Lobo, F., Davis, M., & Burrows, A. (2023). Feasibility of retrofitting medium sized Ro-Pax ferries to utilize hydrogen propulsion and storage technology. *Collaborative Study Between BMT group and PA consulting*, 2023. Disponível em: <https://www.bmt.org/news/2023/retrofitting-ro-pax-ferries-with-hydrogen-propulsion/>. [Acedido em 24 de Janeiro de 2024].

Bengtsson, S., Fridell, E., & Andersson, K. (2012). Environmental assessment of two pathways towards the use of biofuels in shipping. *Energy Policy*, Vol. 44, 451–463. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.02.030> [Acedido em 15 de Janeiro de 2024].

Bicer, Y., & Dincer, I. (2018). Clean fuel options with hydrogen for sea transportation: A life cycle approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43(2), 1179–1193. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.157> [Acedido em 01 de Março de 2024].

Boulougouris, E. (N/A). *Slides Module 1: LNG Fuelled Vessels design Training ‘ case study about new-building and retrofitting LNG Fuelled Vessels ’* [Projeção Visual]. University of Strathclyde Glasgow.

Bouman, E., Lindstad, E., Riialand, A., & Strømman, A. (2017). State of the art technologies, measures, and potential for reducing greenhouse gas emissions from shipping - A review. *Transportation*



*Research Part D: Transport and Environment*. Vol.52, Part A, 2017 Pg. 408-42. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.022> [Acedido em 17 de Maio de 2024].

Bureau Veritas., (N/A). *FuelEU Maritime*. Disponível em: <https://marine-offshore.bureauveritas.com/sustainability/fit-for-55/fueleu-maritime> [Acedido em 17 de janeiro de 2024].

Caiazza, G., Langella, G., Miccio, F., & Scala, F. (2013). An Experimental Investigation on Seawater SO<sub>2</sub> Scrubbing for Marine Application. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Vol. 32, Issue 4, 2023, Pg. 1179–1186. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ep.11723> [Acedido em: 14 de Dezembro de 2023].

Carnival Corporation & PLC. (2015). Exhaust Gas Cleaning System Sampling and Compliance Handbook. Maritime Policy and Env. Team.

Certifhy. (N/A). *CertifHy NGC Certification Process*. Disponível em: <https://www.certifhy.eu/ngc-certification-process/> [Acedido em 02 de Junho de 2024].

Conservation of Clean Air and Water in Europe (Concawe). (2021). A review of the options for decarbonising maritime transport by 2050. *Concawe review*. Vol. 29 Number 2, 2021, Pg. 52-58. Disponível em: <https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/A-review-of-the-options-for-decarbonising-maritime-transport-by-2050.pdf>. [Acedido em 19 de Janeiro de 2024].

Council of the EU. (2023). *FuelEU Maritime initiative: Provisional agreement to decarbonise the maritime sector*. Comunicado de imprensa 23 de março de 2023. Disponível em: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/03/23/fueleu-maritime-initiative-provisional-agreement-to-decarbonise-the-maritime-sector/>. [Acedido em 16 de Janeiro de 2024].

De-Troya, J., Álvarez, C., Fernández-Garrido, C., & Carral, L. (2016). Analysing the possibilities of using fuel cells in ships. *Intern. Journal of Hydrog. Energy*. Vol. 41. Issue 4. 2016, Pg. 2853-2866. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.145> [Acedido em 01 de Junho de 2024].

Det Norske Veritas (DNV). (2020). *Rules for Classification: Ships*. Pt. 6 Ch. 2. Disponível em: <https://static1.squarespace.com/static/5f0d42f16639a745affd633e/t/5ff5d082add77853459846ec/1609945229408/DNVGL-RU-SHIP-Pt6Ch2.pdf>. [Acedido em 19 de janeiro de 2024].

Det Norske Veritas (DNV). (2022). *Energy Transition Outlook 2022: Maritime Forecast to 2050*.

Det Norske Veritas (DNV). (2023). *Alternative Fuels Insight (AFI) platform – Status update December 2023*.

Det Norske Veritas (DNV). (2023). *Challenging road ahead for retrofitting to dual-fuel engines*. DNV Industry Insights. Disponível em: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/challenging-road-ahead-for-retrofitting-to-dual-fuel-engine.html>. [Acedido em 19 de Janeiro de 2024].

Det Norske Veritas (DNV). (2023). *Energy Transition Outlook 2023: Maritime Forecast to 2050*.

Det Norske Veritas (DNV). (N/A). *Fuel EU Maritime*. Disponível em: <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/fuel-eu-maritime/index.html> [Acedido em 16 de Janeiro de 2024].

Dincer, I., & Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40(34), 11094–11111. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035> [Acedido em 25 de Fevereiro de 2024].



Downie, E. (2021). Getting to 30-60: How China's biggest coal power, cement, and steel corporations are responding to national decarbonization pledges. *The Center on Global Energy Policy at Columbia University*. Report on August 25, 2021. Disponível em: [https://www.energypolicy.columbia.edu/wp-content/uploads/2021/08/ChinaBusiness30-60\\_CGEP\\_Report\\_111122.pdf](https://www.energypolicy.columbia.edu/wp-content/uploads/2021/08/ChinaBusiness30-60_CGEP_Report_111122.pdf). [Acedido em 17 de Janeiro de 2024].

Ecospray Technologies S.r.l. (N/A). *EGCS Product Card*. [Disponível em: [https://ecospray.eu/wp-content/uploads/2021/04/EGCS\\_Product-Card\\_ENG.pdf](https://ecospray.eu/wp-content/uploads/2021/04/EGCS_Product-Card_ENG.pdf)] [Acedido em 05 de Agosto de 2024].

Ecospray Technologies S.r.l.. (2022). *Exhaust Gas Cleaning System Technical Manual Scheme B*.

Ellis, J., & Tanneberger, K., (last updated in 2017). Study on the use of ethyl and methyl alcohol as alternative fuels in shipping. *European Maritime Safety Agency*. Final Report version 20151204.5. Pg. 2-4, 31, 41. Disponível em: <https://emsa.europa.eu/air-pollution/alternative-fuels/items.html?cid=329&id=2726>. [Acedido em 19 de janeiro de 2024].

European Commission. (2023). *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on establishing a framework of measures for strengthening Europe's net-zero technology products manufacturing ecosystem* (Net Zero Industry Act). COM/2023/161 final

European Commission. (N/A). *Delivering the European Green Deal*. Disponível em: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en) [Acedido em 16 de Janeiro de 2024].

European Environmental Agency. (2023). *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2023*. Technical guidance to prepare national emission inventories. Dinamarca.

European Inland Barging Platform. (2019). *Hull Air Lubrication*. Disponível em: <https://eibip.eu/publication/hull-air-lubrication/>. [Acedido em 16 de Maio de 2024].

European Maritime Safety Agency. (2017). *Study on the Use of Fuel Cell in Shipping*. DNV.

European Maritime Safety Agency. (2022). *Potential of Ammonia as Fuel in Shipping*, EMSA, Lisbon.

Fleiter, T., Herbst, A., Rehfeldt, M., & Arens, M. (2019). *Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonisation of Industry. Part2: Scenario analysis and pathways to deep decarbonisation*. ICF Consulting Services Ltda. to the European Commission. DG Climate Action. Disponível em: [https://climate.ec.europa.eu/system/files/2020-07/industrial\\_innovation\\_part\\_2\\_en.pdf](https://climate.ec.europa.eu/system/files/2020-07/industrial_innovation_part_2_en.pdf). [Acedido em 21 de Janeiro de 2024].

Fuel Cell Today. (2013). *The Fuel Cell Industry Review 2013*. Disponível em: [http://large.stanford.edu/courses/2014/ph240/ukropina1/docs/fct\\_review\\_2013.pdf](http://large.stanford.edu/courses/2014/ph240/ukropina1/docs/fct_review_2013.pdf) [Acedido em 22 de Dezembro de 2023].

Gerard, L., Vinet, T., & Bensoussan, J. (2022). *LNG Conversion and Jumboisation to Very Large Container Vessels*. *Association Technique Maritime et Aéronautique – ATMA*. Disponível em: [https://www.atma.asso.fr/dyn/memoires/memoire\\_48.pdf](https://www.atma.asso.fr/dyn/memoires/memoire_48.pdf). [Acedido em 20 de Maio de 2024].

Global Maritime Forum. (2023). *Annual progress Report on Green Shipping Corridors*. Getting to Zero Coalition. Disponível em: [https://cms.globalmaritimeforum.org/wp-content/uploads/2023/11/Global-Maritime-Forum\\_Annual-Progress-Report-on-Green-Shipping-Corridors\\_2023.pdf](https://cms.globalmaritimeforum.org/wp-content/uploads/2023/11/Global-Maritime-Forum_Annual-Progress-Report-on-Green-Shipping-Corridors_2023.pdf). [Acedido em 17 de Maio de 2024].



Gore, K., Rigot-Müller, P., & Coughlan, J. (2022). Cost Assessment of Alternative Fuels for Maritime Transportation in Ireland. *Transp. Reseach Part D: Transp. And Environ.* Vol. 110, 2022. 103416. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103416>. [Acedido em 27 de Maio de 2024].

Green Ship Of The Future. (2012). *Vessel Emission Study: Comparison of Various Abatement Technologies to Meet Emission Levels for ECA's. Technical Report.*

Green Shipping Programme. (2023). *Ammonia Powered Bulk Carrier Pilot Report.* Disponível em: [https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2023/03/Ammonia-powered-bulk-carrier-GSP-pilot-report\\_2023.pdf](https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2023/03/Ammonia-powered-bulk-carrier-GSP-pilot-report_2023.pdf). [Acedido em 29 de Janeiro de 2024].

Greenhouse Gas Monitoring And Measurement Interagency Working Group. (2023). *National strategy to advance an integrated U.S. greenhouse gas measurement, monitoring, and information system.* The White House press release. Pg. 42-47, 61.

Grigoriadis, A., Mamarikas, S., Ioannidis, J., Majamäki, E., Jalkanen, J., & Ntziachristos, L. (2021). Development of exhaust emission factors for vessels: A review and meta-analysis of available data. *Atmospheric Environment: X*, Vol. 12, 2021. 100142. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2021.100142> [Acedido em: 17 de Dezembro de 2023].

Grzelakowski, A., Herdzik, J., & Skiba, S. (2022). Maritime Shipping Decarbonization: Roadmap to Meet Zero-Emission in Shipping as a Link in the Global Supply Chains. *Energies Journal*, 15(17), 2022. 6150. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15176150> [Acedido em 02 de Junho de 2024].

Haider, R., Wen, Y., Ma, Z., Wilkinson, D. P., Zhang, L., Yuan, X., Song, S., & Zhang, J. (2021). High temperature proton exchange membrane fuel cells: Progress in advanced materials and key technologies. *Chemical Society Reviews*, Vol. 50(2), 1138–1187. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D0CS00296H> [Acedido em 06 de Março de 2024].

Hansson, J., Brynolf, S., Fridell, E., & Lehtveer, M. (2020). The Potential Role of Ammonia as Marine Fuel—Based on Energy Systems Modeling and Multi-Criteria Decision Analysis. *Sustainability*, 12 (3265). 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12083265> [Acedido em 04 de Maio de 2024].

Horvath, S., Fasihi, M., & Breyer, C. (2018). Techno-Economic Analysis of a Decarbonized Shipping Sector: Technology Suggestions for a Fleet in 2030 and 2040. *Energy Conversion and Management*. Vol. 164, 2018. Pg. 230-241. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.098>. [Acedido em 15 de Janeiro de 2024].

<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20-%20Full%20report%20and%20annexes.pdf> [Acedido em: 18 de Dezembro de 2023].

Hua, J., Wu, Y., & Chen, H. (2017). Alternative Fuel for Sustainable Shipping Across the Taiwan Strait. *Transp. Reseach Part D: Transp. And Environ.* Vol. 52, Part A. 2017 Pg 254-276. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.015>. [Acedido em 25 de Maio de 2024].

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*[Report] Cambridge University Press. Geneva, Suíça.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Sixth Assessment Report – Climate Change 2021: The Physical Science Basis.* Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> [Acedido em 12 de Fevereiro de 2024].



International Energy Agency. (2022). *Global Hydrogen Review 2022*. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022> [Acedido em 20 de Fevereiro de 2024].

International Energy Agency. (2021). *Ammonia Technology Roadmap: Towards more sustainable nitrogen fertilizer production*. IEA. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap> [Acedido em 15 de Fevereiro de 2024].

International Energy Agency. (2021). *The role of e-fuels in decarbonising transport*. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-e-fuels-in-decarbonising-transport> [Acedido em 16 de Janeiro de 2024]

International Maritime Organization (IMO). (2015). *International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels (IGF Code)*.

International Organization for Standardization. (2015). *ISO/TR 15916:2015 - Basic considerations for the safety of hydrogen systems*. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/56546.html> [Acedido em 20 de Fevereiro de 2024].

International Renewable Energy Agency. (2020). *Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5°C climate goal*. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction> [Acedido em 22 de Dezembro de 2023].

International Renewable Energy Agency. (2022). *Green Hydrogen for Industry: A Guide to Policy Making*. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Green-Hydrogen-for-Industry> [Acedido em 18 de Fevereiro de 2024].

International Transport Forum. (2018). *Descarbonising Maritime Transport: pathways to zero-carbon shipping by 2035*. OECD. Pg. 25-43.

IRENA & AEA. (2022). *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*. International Renewable Energy Agency. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2022/May/Innovation-Outlook-Renewable-Ammonia> [Acedido em 25 de Janeiro de 2024].

Jee, J. (2022). Hybrid Multi-Criteria Decision-Making for Marine SO<sub>x</sub> Scrubber Systems. *Journal of Marine Science and Engineering*. Vol. 10(11), 1599. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jmse10111599> [Acedido em: 20 de Dezembro de 2023].

Jiang, L., Kronbak, J., & Christensen, L. (2014). The Costs and Benefits of Sulphur Reduction Measures: Sulphur Scrubbers versus Marine Gas Oil. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 28, 2014. Pg. 19–27. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.12.005> [Acedido em 10 de Dezembro de 2023].

Karatug, Ç., Arslanoglu, Y., & Soares, G. (2022). Feasibility Analysis of the Effects of Scrubber Installation on Ships. *Journal of Mar. Sci. Eng.* 2022, 10(22), 1838. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jmse10121838> [Acedido em 12 de Janeiro de 2024].

Kim, A-Rom., & Seo, J. (2019). The Reduction of SO<sub>x</sub> Emissions in the Shipping Industry: The Case of Korean Companies. *Marine Policy*, Vol. 100, 2019. Pg. 98–106. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.11.024> [Acedido em: 18 de Dezembro de 2023].

Kim, R., & Steen, S. (2023). Potential Energy Savings of Air Lubrication Technology on Merchant Ships. *Intern. Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. Vol. 15, 2023. 100530. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2023.100530> [Acedido em 15 de Maio de 2024].



Kobayashi, H., Hayakawa, A., Somarathne, K. D. K. A., & Okafor, E. C. (2019). Science and technology of ammonia combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 37(1), 109–133. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029> [Acedido em 25 de Fevereiro de 2024].

Korberg, A.D., Brynolf, S., Grahn, M., & Skov, I.R. (2021). Techno-economic assessment of advanced fuels and propulsion systems in future fossil-free ships. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 142, 110861. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110861> [Acedido em 19 de janeiro de 2024].

Lindstad, H., Eskeland, G. S., & Psaraftis, H. N. (2015). Maritime shipping and emissions: A three-layered, damage-based approach. *Ocean Engineering*, 110, 94–101. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.09.012> [Acedido em 16 de janeiro de 2024].

Lloyd's Register & University Maritime Advisory Services (UMAS). (2017). *Zero-Emission Vessels 2030. How Do We Get There?* Lloyd's Register Group Limited. London, UK, 2017. Disponível em: <https://maritime.lr.org/zero-emission-vessels-report>. [Acedido em 23 de Janeiro de 2024].

Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping. (2024). *Well-to-Wake GHG Emissions: Assessment of Maritime Fuels*. Disponível em: [https://cms.zerocarbonsipping.com/media/uploads/documents/NavigaTE-WTW-postion-paper\\_final.pdf](https://cms.zerocarbonsipping.com/media/uploads/documents/NavigaTE-WTW-postion-paper_final.pdf) [Acedido em 30 de Março de 2024].

Maersk plans first metanol retrofit for in-service containership. (2023). *Público*. The Maritime Executive Newsletter. Disponível em: <https://maritime-executive.com/article/maersk-plans-first-methanol-retrofit-for-in-service-containership> [Acedido em 19 de Janeiro de 2024].

Marine Digital. (2021) - *IMO Infographic: 10 years of action on GHG emissions from shipping*. [Documento icónico] Disponível em: [https://marine-digital.com/article\\_imo\\_infographic](https://marine-digital.com/article_imo_infographic) [Acedido em 15 de Janeiro de 2024].

Mckenney, T., Sato, K., & Unseki, T. (2022). The Role of Onboard Carbon Capture in Maritime Decarbonization. *Green Fuel Optionality Project (GFOP)* at the Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping.(MMMCZCS).

Methanex. (2023). *Marine Fuel*. Methanex Corporation. Disponível em: <https://www.methanex.com/about-methanol/marine-fuel/> [Acedido em 20 de Janeiro de 2024].

Methanol Institute. (2023) - *Marine methanol: Future-proof shipping fuel*. [Report]. Pg. 46-48.

Nami, H., Giacomo, B., Nicolas, C., Henrik Lund, F., & Peter Vang, H. (2021). MarE-fuel: Energy efficiencies in synthesising green fuels and their expected cost, MarE-fuel project report 9/9-2021, *DTU Energy Library*. Technical University of Denmark. Disponível em: DOI: 10.13140/RG.2.2.27989.55524 [Acedido em 21 de Janeiro de 2024].

National Centers for Environmental Information, Monthly Global Climate Report for Annual (NOAA). (2018). published online January 2019, USA. Disponível em: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/201813>. [Acedido em 15 de Junho de 2024].

New tool simplifies evaluating the cost of tanker compliance. (2018). *Público*. Riviera Newsletter. Disponível em: <https://www.rivieramm.com/opinion/opinion/new-tool-simplifies-evaluating-the-cost-of-tanker-compliance-24499> [Acedido em 17 dezembro 2023].



Ni, P., Wang, X., & Li, H. (2020). A review on regulations, current status, effects and reduction strategies of emissions for marine Diesel engines. *Fuel*. Vol. 279, 118477. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118477>. [Acedido em 19 de Janeiro de 2024].

Nikopoulou, Z. (2017). Incremental costs for reduction of air pollution from ships: a case study on North European emission control area. *Maritime Policy & Management Journal*, Vol. 44, Pg. 1056-1077. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03088839.2017.1342878> [Acedido em: 23 de Dezembro de 2023].

Oil and Gas Climate Initiative (OGCI) & Conservation of Clean Air and Water in Europe (Concawe). (2022). *Technological, operational and energy pathways for maritime transport to reduce emissions towards 2050*. Final Report. ED13389, Issue Number 6. Disponível em: <https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/Technological-Operational-and-Energy-Pathways-for-Maritime-Transport-to-Reduce-Emissions-Towards-2050.pdf> [Acedido em 17 de Janeiro de 2024].

Organização Marítima Internacional (IMO). (2014). Resolução Mepc. 245 (66). Anexo 5 - *Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships*.

Organização Marítima Internacional (IMO). (2016). *Methanol as marine fuel: environmental benefits, technology readiness, and economic feasibility*. Air pollution and energy efficiency study series. Vol. 5. Pg.30-33. Disponível em: <https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/01/METHANOL-AS-MARINE-FUEL-ENVIRONMENTAL-BENEFITS-TECHNOLOGY-READINESS-AND-ECONOMIC-FEASIBILITY.pdf>. [Acedido em 19 de Janeiro de 2024].

Organização Marítima Internacional (IMO). (2020). *Fourth IMO GHG Study Executive Summary*. IMO: London, UK. Disponível em: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%20Executive%20Summary.pdf>. [Acedido em: 15 de Dezembro de 2023].

Organização Marítima Internacional (IMO). (2020). *Fourth IMO greenhouse gas study Full Report*. Disponível em: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%20Full%20report%20and%20annexes.pdf> [Acedido em: 18 de Dezembro de 2023].

Organização Marítima Internacional (IMO). (N/A). *Air Cavity Lubrication. GloMEEP Project*. Disponível em: <https://glomeep.imo.org/technology/air-cavity-lubrication/>. [Acedido em 15 de Maio de 2024].

Pacific Green Marine Technologies. (2019). *Why marine exhaust scrubbers are cheaper than LNG conversion*. Disponível em: <https://www.pacificgreen-marine.com/articles/why-marine-exhaust-scrubbers-are-cheaper-lng-conversion> [Acedido em 21 de Dezembro de 2023].

Panu, K., Kimmo, T., Niina, K., Päivi Aakko, S., Matthew, B., Hannu, V., Rasmus, P., Sanna, S., Jukka-Pekka, J., & Hilkka, T. (2022). Real-world particle emissions and secondary aerosol formation from a Diesel oxidation catalyst and scrubber equipped ship operating with two fuels in a SECA area. *Environmental Pollution*, Vol. 292, 2022. 118278. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118278> [Acedido em: 15 de Dezembro de 2023].

Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia. (2023). *Diretiva (UE) 2023/959 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 10 de maio de 2023, que altera a Diretiva 2003/87/CE, estabelecendo um sistema de comércio de licenças de emissão de gases com efeito de estufa na União e a Decisão (UE) 2015/1814 relativa à criação e operação de uma reserva de estabilidade do mercado para o sistema*



de comércio de emissões da União (Art. 30.º-C). *Jornal Oficial da União Europeia*. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32023L0959> [Acedido em 10 de Fevereiro de 2024]

Prastyasari, F., Handani, D., Dinariyana, A. & Prakoso, M. (2019). Feasibility Study of Diesel engine replacement on Passenger ships: a system Approach. *WMU Journal Marit. Affairs*, Vol. 18, No.2, Pg 281-296. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13437-019-00169-9>. [Acedido em 26 de Maio de 2024].

Prastyasary, F., Handani, D., Dinarivana, A.A.B., & Prakoso, M. (2019). Feasibility Study of Diesel Engine Replacement on Passenger Ships: a System dynamics Approach. *WMU J Marit Affairs*, Vol. 18, no 2, 2019. Pg. 281-296. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13437-019-00169-9>. [Acedido em 28 de Janeiro de 2024].

Pratiwi, E., Ariana, I., Handani, D., Dinariyana, A., Artana, K. & Abdillah, K. (2022). Economic Feasibility study due to implementation of Dual Fuel Engine of Mini-LNG Carrier in LNG Distribution to Power Plants in Bali and Lombok. The 3<sup>rd</sup> Maritime Safety International Conference (MASTIC). *IOP Conference Series Earth and Environmental Series*. 1081(2022).

Resolução MEPC. 245(66). Anexo 5. (2014). *Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships*.

Resolução MEPC. 328(76). Anexo 1. *Regulamento 13 – Nitrogen Oxides (NOx)*. Organização Marítima Internacional (IMO).

Resolução MEPC. 328(76). Anexo 1. *Regulamento 14 – Sulphur Oxides (SOx) and Particulate Matter*. Organização Marítima Internacional (IMO).

Resolução MEPC. 328(76). Anexo 1. *Regulamento 24 – Required EEDI*. Organização Marítima Internacional (IMO).

Resolução MEPC. 377(80). Anexo I. (2023). *2023 IMO Strategy on reduction on GHG emissions from ships*. Organização Marítima Internacional (IMO).

Resolução MEPC.337(76). (2021). *Guidelines on the Reference Lines for Use with Operational Carbon Intensity Indicators (CII Reference Lines Guidelines, G2)*. Organização Marítima Internacional (IMO).

Resolução MEPC.338(76). (2021). *Guidelines on the Operational Carbon Intensity Reduction Factors to Reference Lines (CII Reduction Factors Guidelines, G3)*. Organização Marítima Internacional (IMO).

Ritari, A., Spoof-Tuomi, K., Huotari, J., Niemi, S., & Tammi, K. (2021). Emission Abatement Technology Selection, Routing and Speed Optimization of Hybrid Ships. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9, 944. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jmse9090944> [Acedido em 12 de Dezembro de 2023].

Saygin, D., Blanco, H., Boshell, F., Cordonnier, J., Rouwenhorst, K., Lathwal, P., & Gielen, D. (2023). Ammonia Production from Clean Hydrogen and the Implications for Global Natural Gas Demand. *Sustainability* 15(2). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15021623>. [Acedido em 20 de Maio de 2024]

SEA-LNG Foundation. (2022). *LNG as Marine Fuel: The Retrofit Investment*. Disponível em: [https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2022/08/VLCC\\_Retrofit\\_Investment\\_Case\\_Study.pdf](https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2022/08/VLCC_Retrofit_Investment_Case_Study.pdf). [Acedido em 19 de Maio de 2024]



SEA-LNG. (2019). *Comparison of Alternative Marine Fuels*. Disponível em: [https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2019/09/SEA-LNG-DNV-GL-Comparison-of-Alternative-Marine-Fuels-2019\\_09.pdf](https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2019/09/SEA-LNG-DNV-GL-Comparison-of-Alternative-Marine-Fuels-2019_09.pdf) [Acedido em 20 de Janeiro de 2024].

Shipping Watch. (2023). *Seaspan and Hapag-Lloyd to retrofit up to 60 ships to run on metanol*. Disponível em: <https://shippingwatch.com/suppliers/article16273384.ece> [Acedido em 19 de Janeiro de 2024].

State of Green. (2022). *Carbon capture, utilisation, and storage*. Disponível em: <https://stateofgreen.com/en/publications/carbon-capture-utilisation-and-storage/>. [Acedido em: 21 de Janeiro de 2024].

Steuer, C. (2019). Outlook for Competitive LNG Supply,. *The Oxford Institute for Energy Studies*., Disponível em: <https://doi.org/10.26889/9781784671310> [ Acedido em 22 de Dezembro de 2023].

Sustainable Ships. (2023). *The state of methanol as marine fuel 2023*. Disponível em: <https://www.sustainable-ships.org/stories/2023/methanol-marine-fuel>. [Acedido em 19 de Janeiro de 2024].

Svanberg, M., Ellis, J., Lundgren, J., & Landälv, I. (2018). Renewable methanol as a fuel for the shipping industry. *Renewable and sustainable energy reviews*. Vol. 94. Pg 1217-1228. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.058> [Acedido em: 18 de janeiro de 2024].

Tan, Y. (2021). The Future of a Clean and Sustainable Shipping Industry. *Global Research and Consulting Group Insights*. Disponível em: <https://insights.grcglobalgroup.com/the-future-of-a-clean-and-sustainable-shipping-industry/>. [Acedido em 16 de Maio de 2024].

Trozzi, C. (2010). Emission Estimate Methodology for Maritime Navigation, US EPA. *In Proceedings of the 19th International Emissions Inventory Conference*, San Antonio, TX, USA, 27–30 Setembro de 2010.

U.S. Department of Energy. (2019). *2018 Annual Progress Report: DOE Hydrogen and Fuel Cells Program*. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73353.pdf> [Acedido em 05 de Março de 2024].

U.S. Department of Energy. (2022a). *Types of fuel cells*. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells> [Acedido em 05 de Março de 2024]

U.S. Department of Energy. (2022b). *Fuel cell basics*. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-basics> [Acedido em 05 de Março de 2024].

U.S. Department of State., (2021). Launching the First Movers Coalition at the 2021 UN Climate Change Conference. *Fact Sheet*. Disponível em: <https://www.state.gov/launching-the-first-movers-coalition-at-the-2021-un-climate-change-conference/>. [Acedido em 17 de Janeiro de 2023].

UK Ship Emission Inventory: Final Repor. (2010). *Publicado: Entec UK 2010*., Disponível em: [https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat15/1012131459\\_21897\\_Final\\_Report\\_291110.pdf](https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat15/1012131459_21897_Final_Report_291110.pdf) [Acedido em 20 de Dezembro de 2023].

UN Climate Change. (2021). China's Mid-Century Long-Term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy. *Long-Term Strategies Portal*.



US Environmental Protection Agency. (2022). *Air Quality Agreement: Progress Report 2020 - 2022*. Disponível em: [https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-03/22119.02%20CAN-US%20Air%20Quality%20Agreement-EN\\_V08\\_508\\_3012023\\_508pass.pdf](https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-03/22119.02%20CAN-US%20Air%20Quality%20Agreement-EN_V08_508_3012023_508pass.pdf) [Acedido em 20 de Dezembro de 2023].

Van Hoecke, L., Laffineur, L., Campe, R., Perreault, P., Verbruggen, S., & Lenaerts, S. (2021). Challenges in the use of Hydrogen for Maritime Applications. *Energy & Environmental Science*. Issue 2. 2021. Pg. 815-843. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D0EE01545H> [Acedido em 02 de Junho de 2024].

Vries, N. (2019). *Safe and effective application of ammonia as a marine fuel*. [Thesis for the M.Sc. degree in marine technology in specialization of marine engineering]. TUDelft University. Disponível em: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:be8cbe0a-28ec-4bd9-8ad0-648de04649b8> [Acedido em 21 de Janeiro de 2024].

Wilailak, S., Yoo, B.H., Kim, Y.P., & Lee, C.J. (2021). Parametric Analysis and Design Optimization of Wet SOx Scrubber System in Marine Industry. *Fuel*, Vol. 304, 121369. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121369> [Acedido em: 14 de Dezembro de 2023].

Winnes, H., Fridell, E., & Moldanová, J. (2020). Effects of Marine Exhaust Gas Scrubbers on Gas and Particle Emissions. *Journal of Marine Sciences and Engineering*, Vol. 8, 299. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jmse8040299> [Acedido em: 14 de Dezembro de 2023].

Wu, S., Miao, B. & Chan, S., (2022). Feasibility Assessment of a Container Ship Applying Ammonia cracker-integrated solid Oxide Fuel Cell Technology. *Intern. Journal of Hydrog. En.* Vol 47, Issue 63, Pg. 27166-27176. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.068>. [Acedido em: 23 de Janeiro de 2024].

Yang, J., Tang, T., Jiang, Y., Karavalakis, G., Durbin, T., Miller, J., Cocker, D., & Johnson, K. (2021). Controlling emissions from an ocean-going container vessel with a wet scrubber system. *Fuel*. Vol. 304, 121323. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121323> [Acedido em 22 de Dezembro de 2023].

Zhou, J., Zhou, S., & Zhu, Y. (2017). Characterization of Particle and Gaseous Emissions from Marine Diesel Engines with Different Fuels and Impact of After-Treatment Technology. *Energies*, Vol. 10, 1110. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en10081110>. [Acedido em: 14 de Dezembro de 2023].

Zis, T., Angeloudis, P., Bell, M. G. H., & Psaraftis, H. N. (2016). Payback Period for Emissions Abatement Alternatives: Role of Regulation and Fuel Prices. *Transportation Research Record*, 2549(1), 37-44. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/2549-05> [Acedido em 12 de Dezembro de 2023].

## **APÊNDICES**

### **Lista de Apêndices**

**Apêndice I** – Cálculo do EEXI do navio em estudo

**Apêndice II** - Cálculo do CII do navio em estudo



## APÊNDICE I - CÁLCULO DO EEXI DO NAVIO EM ESTUDO

### Variáveis do Processo

GT	Pem MAX	SFC mgo	SFOC hfo	PSM,MAX	PEM Nr.	PAE <sub>1</sub>	PAE <sub>2</sub>	$\eta_{gen}$	$\eta_{PTI}$	P <sub>PTL_1</sub>	P <sub>PTL_2</sub>	CF <sub>MGO</sub>	CF <sub>HFO</sub>	V <sub>ref</sub>
102239	20000	183.2	208.9	40000	2	9322	9773.6	0.97	0.971	31851.5	27073.8	3.206	3.114	21.16

### Cálculo EEXI

EEXI <sub>ATT_0</sub>	EEXI <sub>ATT_1</sub>	EEXI <sub>ATT_2</sub>	EEXI <sub>REQ</sub>
12.52	11.30	10.00	10.13



## APÊNDICE II - CÁLCULO DO CII DO NAVIO EM ESTUDO

Item	2022	2023	2024
<b>CII</b>	11.4	10.9	10.26
<b>CO<sub>2</sub> emitido</b>	115389270000.0	111256992000.0	104718000000.0
<b>capacidade</b>	102239	102239	102239
<b>Distância viajada</b>	99339	99810	99810
<b>CII<sub>REF</sub></b>	11.215	11.215	11.215
<b>a</b>	930	930	930
<b>c</b>	0.383	0.383	0.383
<b>CII<sub>REQ</sub></b>	11.21164881	11.2094	11.2072
<b>Z</b>	3%	5%	7%



## **ANEXOS**

### **Lista de Anexos**

**Anexo I** - Tipos e principais características das células de combustível

**Anexo II** - *Datasheet* das Torres de Lavagem Ecospray

**Anexo III** - Navio estudado em processo final de docagem

**Anexo IV** – Curva de Potência x Velocidade Utilizada para o Cálculo do EEXI

**Anexo V** – Parâmetros para Determinação dos Valores de Referência para o Navio em Estudo

**Anexo VI** – Fator de Redução do EEXI Relativo ao EEDI

**Anexo VII** – Parâmetros utilizados para a determinação das linhas de referência do ano de 2019, utilizados no cálculo do CII

**Anexo VIII** - Fator de Redução do CII em Relação às Linhas de Referência de 2019

**Anexo IX** - Esquemas P&ID correspondentes à instalação da torre de lavagem no DG#1 do navio em estudo

**Anexo X** - Esquema de funcionamento do dispositivo de injeção de combustível



## ANEXO I - TIPOS E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL

	Temp. [°C]	Eletrólito	Combustível	Desvantagem	Vantagem	Utilização	Eficiência
	60-100	Grupos hidróxidos, geralmente hidróxido de potássio (KOH)	Hidrogénio puro	O eletrólito reage com CO <sub>2</sub>	Possibilidade de utilização de hidrogénio de baixa qualidade, alta eficiência	Programas espaciais	60%
<b>Célula de Combustível de Membrana de Prótons (PEMFC)</b>	60-130	Matriz polimérica que consiste em um ácido do grupo sulfônico	Hidrogénio puro. Gasolina ou Gás natural + etapa de reforma para produção de hidrogénio	Maior custo devido à necessidade de utilização de eletrocatalisadores como metais preciosos para facilitar a reação eletroquímica	Não possuem componentes líquidos, rápida inicialização devido à sua baixa temperatura de operação e maior durabilidade que as células de combustível de alta temperatura	Amplamente utilizada em veículos automotivos e aquecimento da água em ambientes residenciais	30%
<b>Célula de Combustível de Metanol Direto (DMFC)</b>	60-130	Ácidos	Metanol	Liberação de CO <sub>2</sub> no processo e possibilidade de consumo excessivo de combustível caso haja migração de metanol do anodo para o catodo	Devido a densidade alta do metanol, este permanece no estado líquido em temperatura ambiente, não utilização de reformadores de combustíveis	Sistemas de baixa potencia: Computadores e telefones celulares	30%-40%
<b>Célula de Combustível de Ácido Fosfórico (PAFC)</b>	150-220	Ácido fosfórico concentrado (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ) disperso em matriz de carboneto de silício	H <sub>2</sub> S residual do tratamento de águas cinzas/pretas	Necessidade de evitar que o monóxido de carbono ou compostos de enxofre contaminem o anodo	Não reagem com o CO <sub>2</sub> . É possível utilizar o metanol produzido em sítios urbanos no tratamento de águas residuais como combustível	Cogeração e máquinas de absorção que produzem frio	85% na cogeração e 35%-45% em outras aplicações
<b>Célula de Combustível de Carbonato Fundido (MCFC)</b>	600-650	Eletrólito fundido composto por uma mistura de carbonatos de metais alcalinos	Gases resultantes da reforma do gás natural e do carvão	Maior probabilidade de corrosão e desgaste de seus componentes devido a sua alta temperatura de operação	Capacidade de consumir combustíveis contendo monóxido de carbono, como os gases resultantes da reforma do gás natural ou do carvão.	Cogeração e produção centralizada de eletricidade	60%
<b>Célula de Combustível de Óxido Sólido (SOFC)</b>	800-1000	Óxidos Sólidos	Metanol e outros hidrocarbonetos	Alto tempo de inicialização devido a sua alta temperatura e exigências relativamente ao material de fabrico de seus componentes, para alcançar a estabilidade e evitar a oxidação	Relativo baixo custo e não necessidade de utilização de materiais preciosos como catalisadores	Cogeração e Trigerção, Usinas de ciclo combinado	60%



**ANEXO II - *DATASHEET* DAS TORRES DE LAVAGEM ECOSPRAY**





# Exhaust Gas Cleaning Systems

 Exhaust Gas Cleaning

# The EGCS family

Inline & U-Type

Inline  
**1750**



Inline  
**2600**



Inline  
**3600**



U-Type  
**2200**



U-Type  
**3400**



U-Type  
**5000**



## Exhaust Gas Cleaning

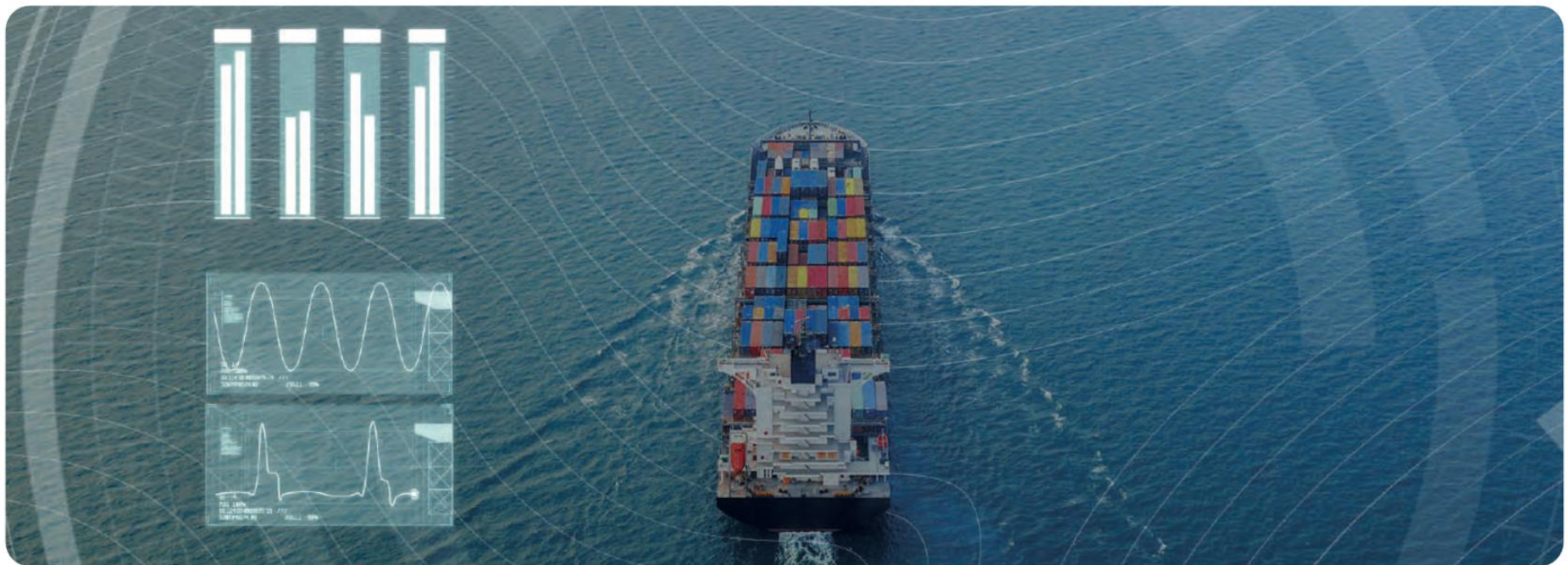
A **wide range of EGCS** to meet all DeSOx needs:

- Open Loop and Hybrid
- Inline and U-Type configuration
- From 1750 to 5000 mm in diameter
- From 5 to 48 MW rated engines power

Turn your fleet green with Ecospray advanced air quality systems: based on a proprietary multi-pollutant technology, they are available both for retrofit and newbuilding, on board of any vessel.

# What's new: Smart scrubber

A new IoT-based desulphurization solution, managed using artificial intelligence. The advanced remote AI-enabled control & monitoring system is the technical core of our solution, allowing constant optimization and best-in-class performances to the EGCS.



## Benefits

✓  
Guarantee constant compliance with IMO regulations.

↗  
Significant savings in terms of performance and maintenance through remote monitoring and advanced life cycle analysis

💰  
Substantial reduction in operating costs, longer equipment life and fuel savings by optimizing system operations.

# Main benefits

## Why choose Ecospray EGCS?

1. Time-tested systems: more than 15 years of **experience** in exhaust gas cleaning.
2. Proven and certified **performances**.
3. **Flexible, compact** and **easy** to install.
4. **Reliable** equipment, **tested** and **optimized** by thousands of hours of operation at sea.
5. **Skilled** project management to assure hassle-free installation.
6. Global **after sales Service** (operations support; performance optimization, lifecycle management, spares and consumables).
7. Thanks to **One**, our signature platform, **everything is now connected**: from real-time awareness to performance, analytics, and maintenance services, your system is under control.
8. **Lower environmental impact** in terms of air emissions and wash water.
9. Additional Class Notations – i.e. the **Ultra-Low Emission Vessel** (ULEV) – can be obtained implementing a mix of our technologies: Advanced Wash Water Filtration, Wet ElectroStatic Precipitator for black smoke and PM abatement, Water Fuel Emulsion for NOx, PM and fuel consumption reduction.

Performance	
SO <sub>2</sub> Removal	SO <sub>2</sub> (ppm) / CO <sub>2</sub> (% v/v) ≤ 4,3
SW turbidity (DeSOx Tower discharge)	< 25 FNU
SW pH (after dilution)	≥ 6,5 at 4 mt from OB (IMO) ≥ 6,0 at OB
SW PAH (DeSOx Tower discharge)	< 50 microg/L normalized at 45 t/MW(MCR)/h

# The EGCS Open Loop system

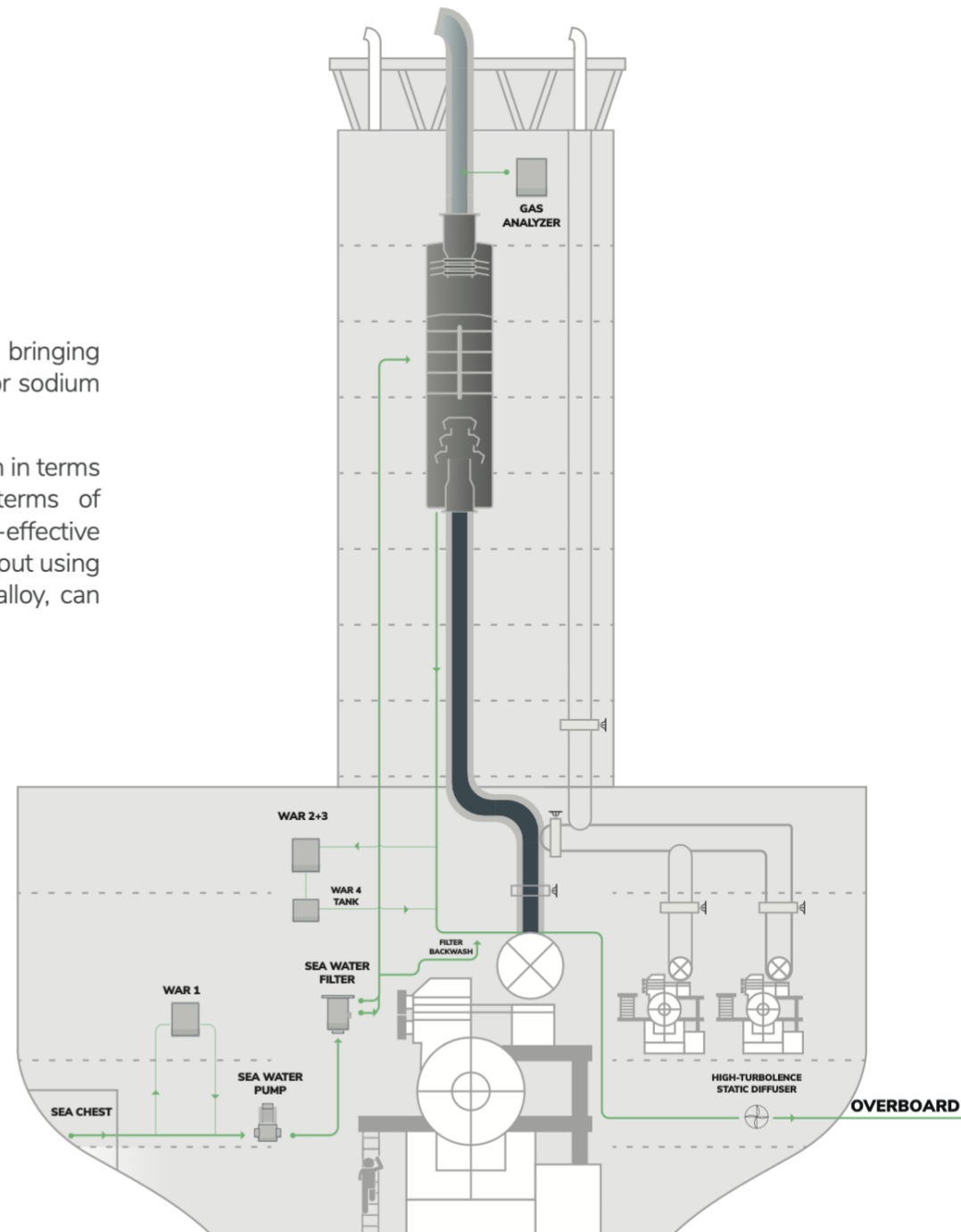
Our EGCS systems are available in two different configurations: Open Loop and Hybrid systems.

**The EGCS – Open Loop system** uses only seawater to remove SO<sub>x</sub> bringing it below the IMO limit without the addition of any reagent like caustic soda or sodium carbonate.

The **Open Loop** configuration is characterized by simplicity and flexibility both in terms of installation, thanks to a limited number of components, and in terms of operation and maintenance. The Open Loop system represents the most cost-effective solution in terms of CAPEX and OPEX in order to meet sulfur regulations without using low Sulfur fuel. The DeSO<sub>x</sub> tower (scrubber), made in corrosion resistant alloy, can operate either in wet or dry conditions.

## Options:

- WESP and Catalytic Dry Filter to remove PM, soot and uncombusted HC.
- Advanced Wash Water filtration system specifically engineered for maneuvering operation or ship alongside to avoid foam at the overboard and to further reduce PM in the wash water discharge.
- Water Fuel Emulsion for NO<sub>x</sub>, PM and fuel consumption reduction.
- Proprietary gas cooling (TTSMS-Thermal Transient Shock Mitigation System) to reduce the temperature of the gases (fogging technology) to prevent thermal shock to the DeSO<sub>x</sub> tower.



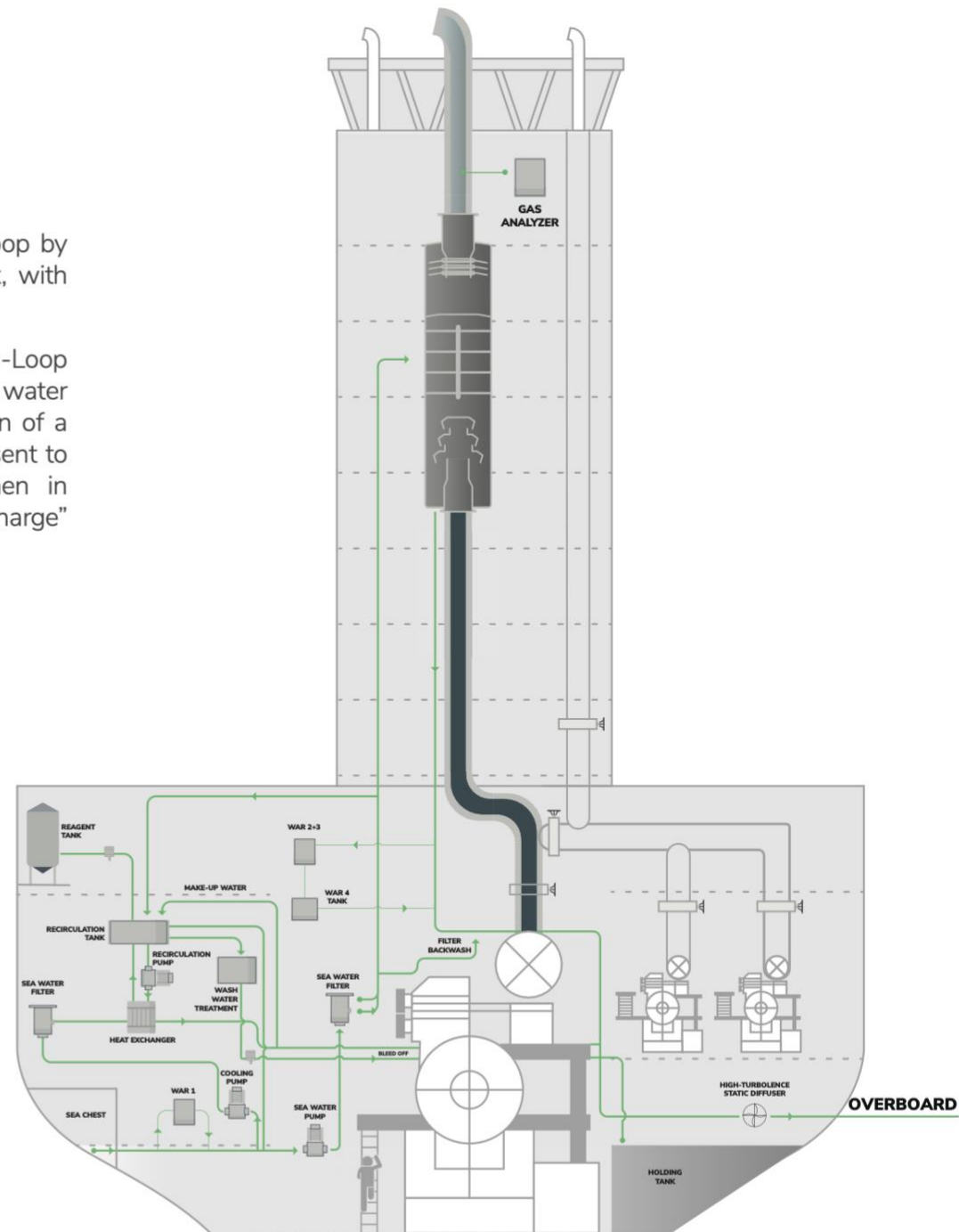
# The EGCS Hybrid system

**The Hybrid version** can operate as an Open Loop EGCS or in Closed Loop by recirculating the seawater added with an alkaline additive to remove SO<sub>x</sub>, with no discharge overboard.

The **Hybrid system** can easily switch between Open Loop and Closed-Loop operation mode. In open-loop, the SO<sub>2</sub> removal is controlled only by sea water injection, while in closed loop the SO<sub>2</sub> removal is controlled by the addition of a reagent to the wash water. In Closed Loop mode the water blow down is sent to a water treatment system and then either discharged overboard when in compliance situation, or temporarily sent to a holding tank in case “zero-discharge” mode is required.

### Options:

- Plume reducer systems.
- WESP and Catalytic Dry Filter to remove PM, soot and uncombusted HC.
- Water Fuel Emulsion for NO<sub>x</sub>, PM and fuel consumption reduction.
- Proprietary gas cooling gas cooling (TTSMS-Thermal Transient Shock Mitigation System) to reduce the temperature of the gases (fogging technology) to prevent thermal shock to the DeSO<sub>x</sub> tower.



# Key Features

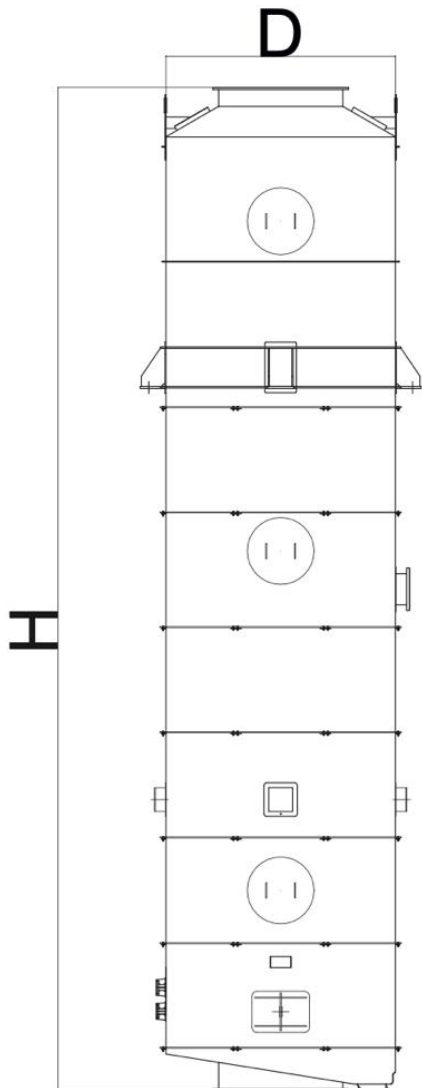
Designed for your needs

The core of our system is the **DeSOx tower**, available in a wide range of sizes to serve different kind of ships.

1. Proprietary spraying technology to **maximize efficiency** and **minimize pressure drop**.
2. **High efficiency reflecting** in low power consumption.
3. DeSOx tower made in corrosion **resistant materials**.
4. **Multiple inlets** design available.
5. Compact design to **minimize installation** downtime **and costs**.
6. **TTSMS** (Thermal Transient Shock Mitigation System) for inline scrubbers: consists of an inlet evaporative gas cooling system to mitigate the thermal transient shocks in the DeSOx tower during the start up in hot conditions.

# Technical Information

## Inline

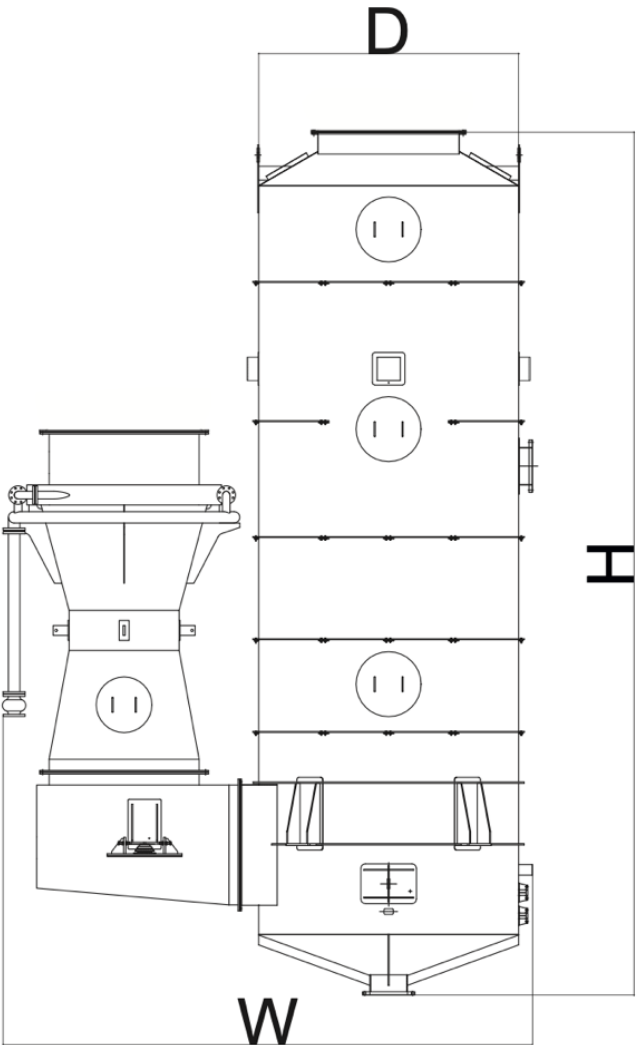


Maximum nominal power	Tower size	Demister type	Tower diameter (D)	Tower height (H)	Dry weight	Avg. El. Power consumption
MW	-		mm	mm	kg	kW
<b>6</b>	<b>1750</b>	Chevron	1.750	8.000	4.200	85
<b>8</b>	<b>2000</b>	Chevron	2.000	9.800	5.200	110
<b>9</b>	<b>2100</b>	Chevron	2.100	8.400	5.300	125
<b>10</b>	<b>2200</b>	Chevron	2.200	10.200	6.400	140
<b>12</b>	<b>2400</b>	Chevron	2.400	10.500	7.100	175
<b>14</b>	<b>2600</b>	Chevron	2.600	10.800	8.000	210
<b>16</b>	<b>2800</b>	Chevron	2.800	11.000	9.000	255
<b>18</b>	<b>3000</b>	Chevron	3.000	11.200	12.400	290
<b>20</b>	<b>3200</b>	Chevron	3.200	11.500	13.300	300
<b>23</b>	<b>3400</b>	Flat	3.400	11.000	13.800	345
<b>26</b>	<b>3600</b>	Flat	3.600	11.500	15.000	390

Note:  
Not binding weights and dimensions

# Technical Information

## U-Type



Maximum nominal power	Tower size	Demister type	Tower diameter (D)	Tower height (H)	Tower width (W)	Dry weight	Avg. El. Power consumption
MW	-		mm	mm	mm	kg	kW
<b>6</b>	<b>1800</b>	Chevron	1.800	8.370	3.800	6.000	85
<b>8</b>	<b>2000</b>	Chevron	2.000	9.260	4.200	6.800	110
<b>10</b>	<b>2200</b>	Flat	2.200	8.900	4.550	6.900	140
<b>12</b>	<b>2400</b>	Flat	2.400	9.200	5.000	7.800	170
<b>14</b>	<b>2600</b>	Flat	2.600	8.900	5.250	8.900	195
<b>16</b>	<b>2800</b>	Flat	2.800	7.700	5.700	10.300	240
<b>18</b>	<b>3000</b>	Flat	3.000	8.250	6.000	12.000	270
<b>20</b>	<b>3200</b>	Flat	3.200	8.800	6.500	14.050	290
<b>23</b>	<b>3400</b>	Flat	3.400	9.340	6.850	16.000	330
<b>26</b>	<b>3600</b>	Flat	3.600	9.860	7.200	17.600	375
<b>33</b>	<b>4000</b>	Flat	4.000	10.800	8.050	21.000	480
<b>39</b>	<b>4300</b>	Flat	4.300	11.600	8.600	24.600	565
<b>48</b>	<b>4600</b>	Flat	4.600	12.500	9.200	28.100	695
<b>58</b>	<b>5000</b>	Flat	5.000	13.500	10.100	34.200	840

Notes:

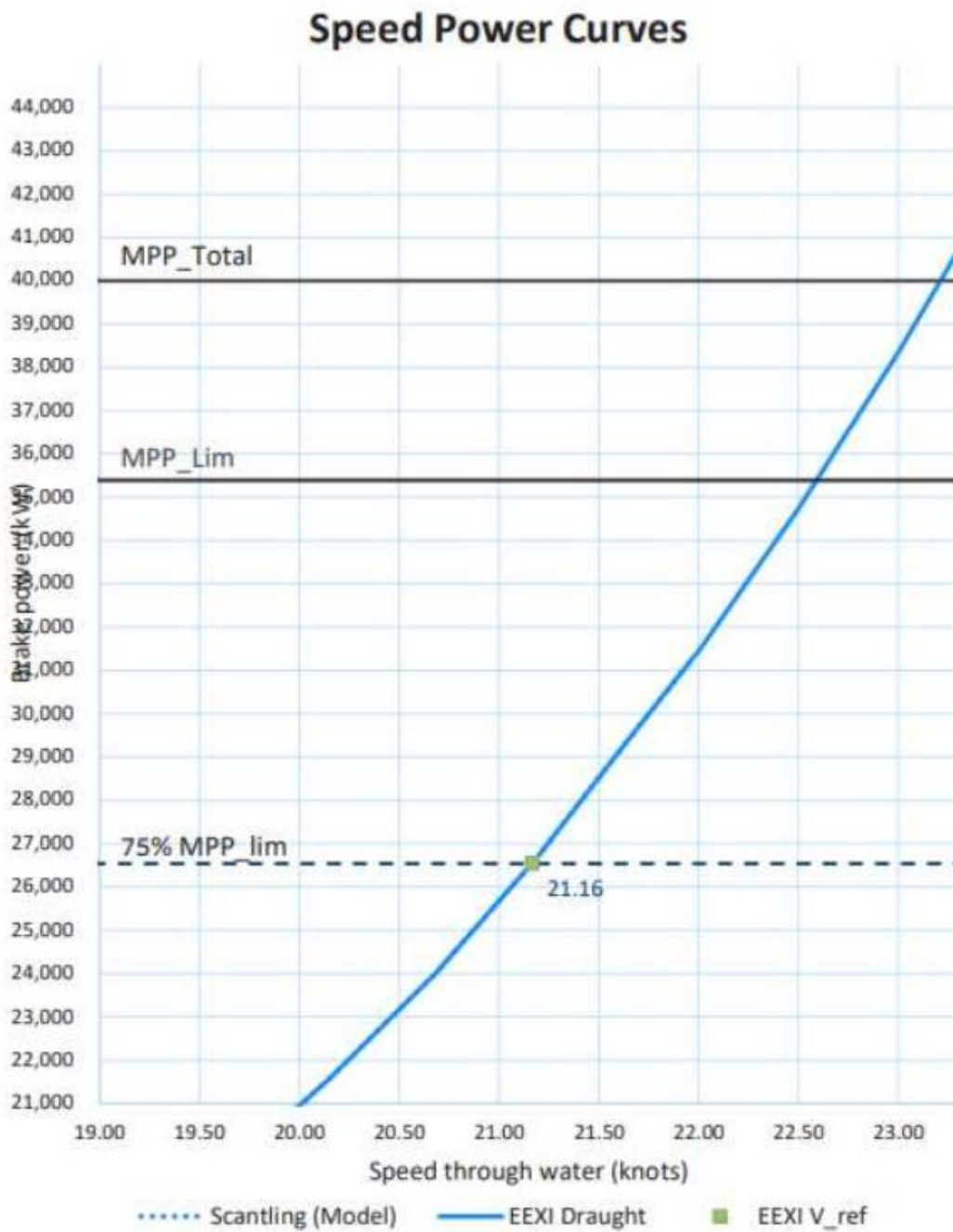


### ANEXO III - NAVIO ESTUDADO EM PROCESSO FINAL DE DOCAGEM





## ANEXO IV - CURVA DE POTÊNCIA x VELOCIDADE UTILIZADA PARA O CÁLCULO DO EEXI





**ANEXO V - PARÂMETROS PARA DETERMINAÇÃO DOS VALORES DE REFERÊNCIA PARA O NAVIO EM ESTUDO**

<b>Ship type defined in regulation 2</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>
2.33 Ro-ro cargo ship (vehicle carrier)	$(DWT/GT)^{0.7} \cdot 780.36$ where $DWT/GT < 0.3$  1812.63 where $DWT/GT \geq 0.3$	DWT of the ship	0.471
2.34 Ro-ro cargo ship	1405.15	DWT of the ship	0.498
2.35 Ro-ro passenger ship	752.16	DWT of the ship	0.381
2.38 LNG carrier	2253.7	DWT of the ship	0.474
2.39 Cruise passenger ship having non-conventional propulsion	170.84	GT of the ship	0.214

Fonte: Resolução MEPC.251(66), 2014.



## ANEXO VI – FATOR DE REDUÇÃO DO EEXI RELATIVO AO EEDI

Ship type	Size (dwt or gt)	Reduction factor
<b>Bulk carrier</b>	10,000 - 19,999	0 - 20%*
	20,000 - 199,999	20%
	200,000+	15%
<b>Gas carrier</b>	2,000 - 9,999	0 - 20%*
	10,000 - 14,999	20%
	15,000+	30%
<b>Tanker</b>	4,000 - 19,999	0 - 20%*
	20,000 - 199,999	20%
	200,000+	15%
<b>Container ship</b>	10,000 - 14,999	0 - 20%*
	15,000 - 39,999	20%
	40,000 - 79,999	30%
	80,000 - 119,999	35%
	120,000 - 199,999	45%
	200,000+	50%
<b>General cargo ship</b>	3,000 - 14,999	0 - 30%*
	15,000+	30%
<b>Refrigerated cargo carrier</b>	3,000 - 4,999	0 - 15%*
	5,000+	15%
<b>Combination carrier</b>	4,000 - 19,999	0 - 20%*
	20,000+	20%
<b>LNG carrier</b>	10,000+	30%
<b>Ro-ro cargo ship (vehicle)</b>	10,000+	15%
<b>Ro-ro cargo ship</b>	1,000 - 1,999	0 - 5%*
	2,000+	5%
<b>Ro-ro passenger ship</b>	250 - 999	0 - 5%*
	1,000+	5%
<b>Cruise passenger ship</b>	25,000 - 74,999 gt	0 - 30%*
	75,000+	30%

\*A taxa de redução é interpolada linearmente entre os tamanhos dos navios, aplicando-se a meta mais baixa aos navios mais pequenos.

Fonte: Resolução MEPC.328(76), 2021.



**ANEXO VII - PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A DETERMINAÇÃO DAS  
LINHAS DE REFERÊNCIA DO ANO DE 2019, UTILIZADOS NO CÁLCULO  
DO CII**

Ship type		Capacity	<i>a</i>	<i>c</i>
Bulk carrier	279,000 DWT and above	279,000	4745	0.622
	less than 279,000 DWT	DWT	4745	0.622
Gas carrier	65,000 and above	DWT	14405E7	2.071
	less than 65,000 DWT	DWT	8104	0.639
Tanker		DWT	5247	0.610
Container ship		DWT	1984	0.489
General cargo ship	20,000 DWT and above	DWT	31948	0.792
	less than 20,000 DWT	DWT	588	0.3885
Refrigerated cargo carrier		DWT	4600	0.557
Combination carrier		DWT	40853	0.812
LNG carrier	100,000 DWT and above	DWT	9.827	0.000
	65,000 DWT and above, but less than 100,000 DWT	DWT	14479E10	2.673
	less than 65,000 DWT	65,000	14479E10	2.673
Ro-ro cargo ship (vehicle carrier)		GT	5739	0.631
Ro-ro cargo ship		DWT	10952	0.637
Ro-ro passenger ship		GT	7540	0.587
Cruise passenger ship		GT	930	0.383

Fonte: Resolução MEPC.337(76), 2021.



**ANEXO VIII - FATOR DE REDUÇÃO (Z%) DO CII EM RELAÇÃO ÀS  
LINHAS DE REFERÊNCIA DE 2019**

Year	Reduction factor relative to 2019
2023	5%*
2024	7%
2025	9%
2026	11%
2027	- **
2028	- **
2029	- **
2030	- **

Notas:

\*São definidos fatores Z de 1%, 2% e 3% para os anos de 202 a 2022, respetivamente, até a entrada em vigor da medida.

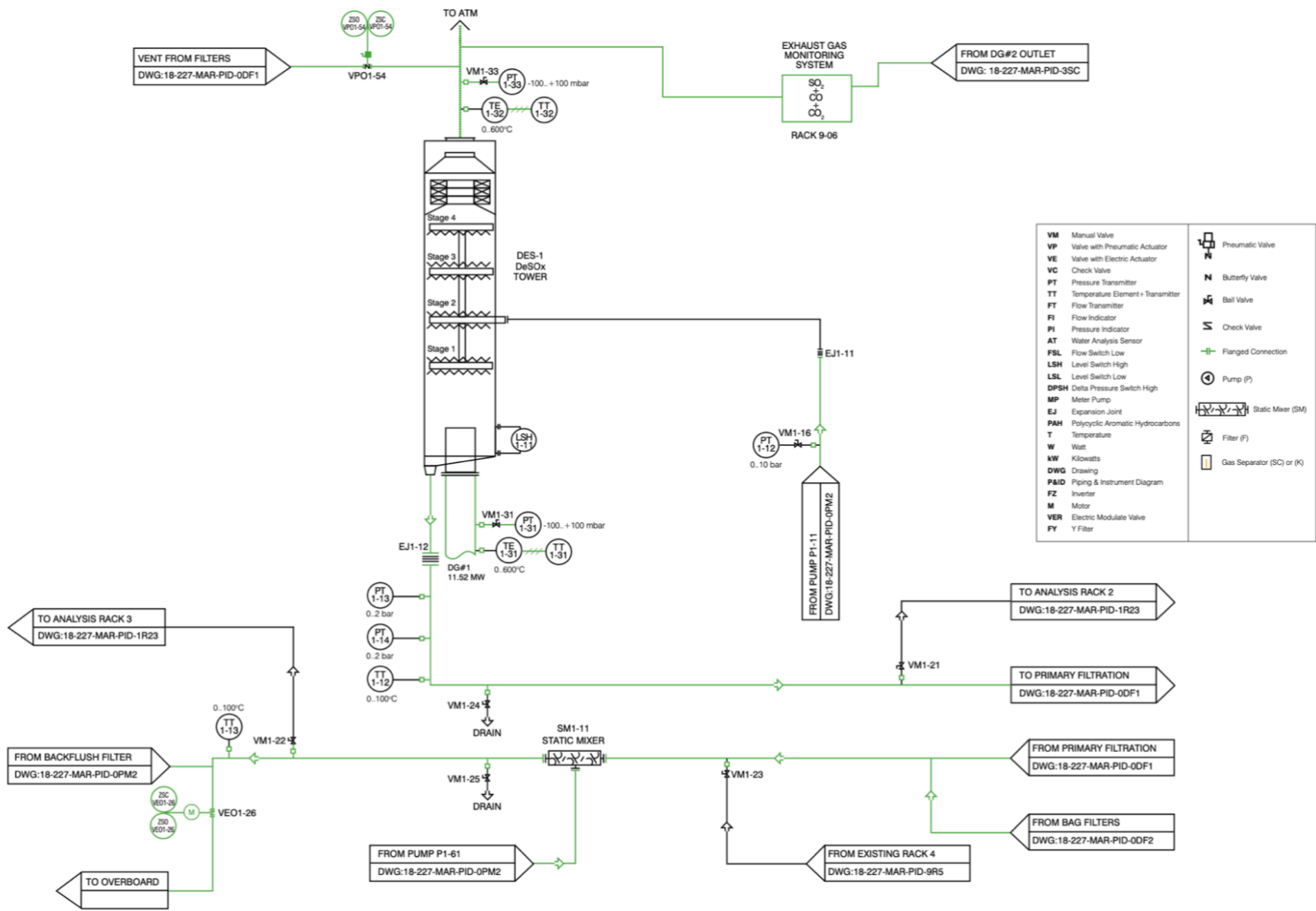
\*\*Os fatores Z para os anos de 2027 a 2030 devem ser reforçados e desenvolvidos tendo em conta a revisão da medida.

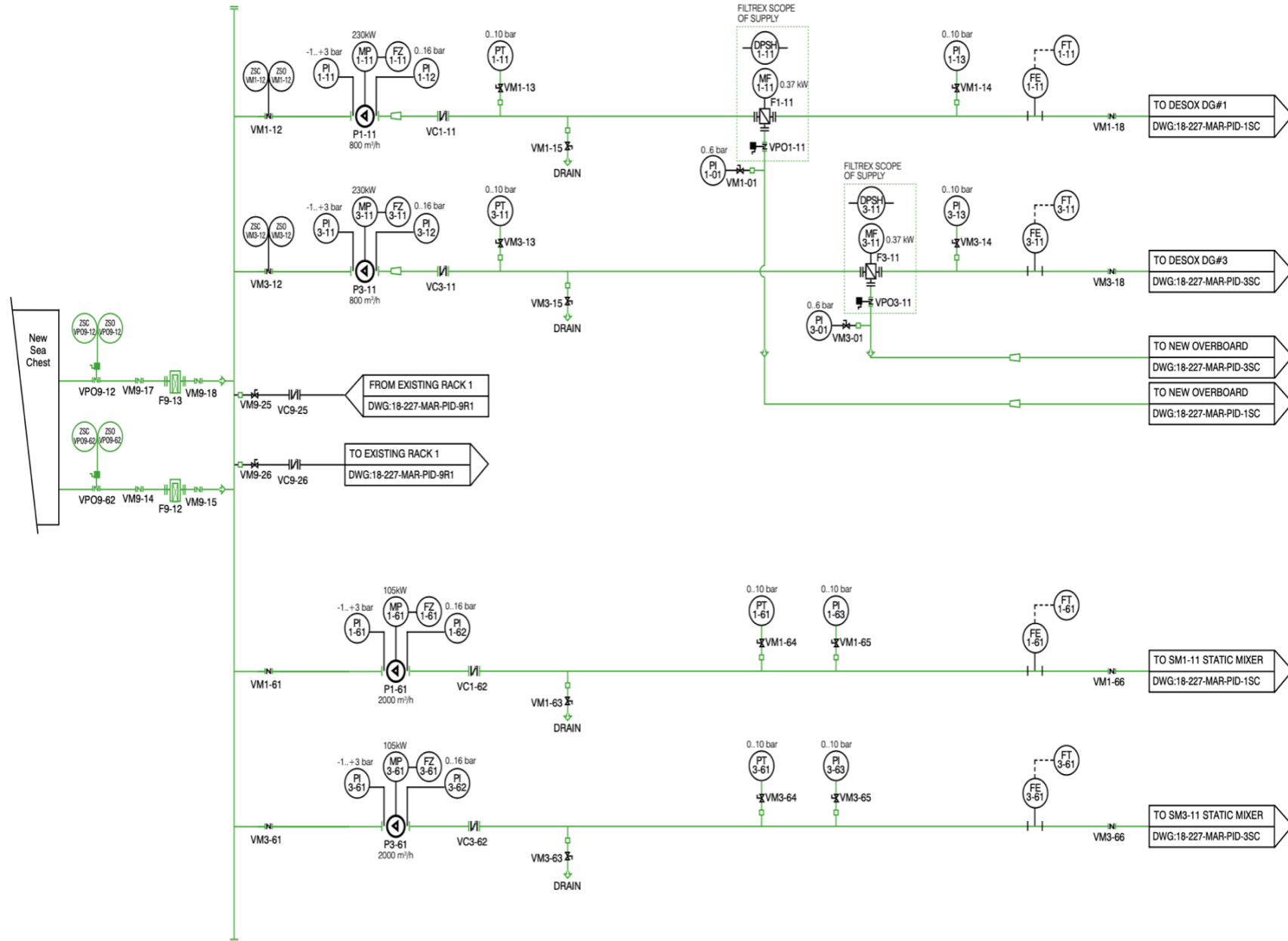
Fonte: Resolução MEPC.338(76), 2021.

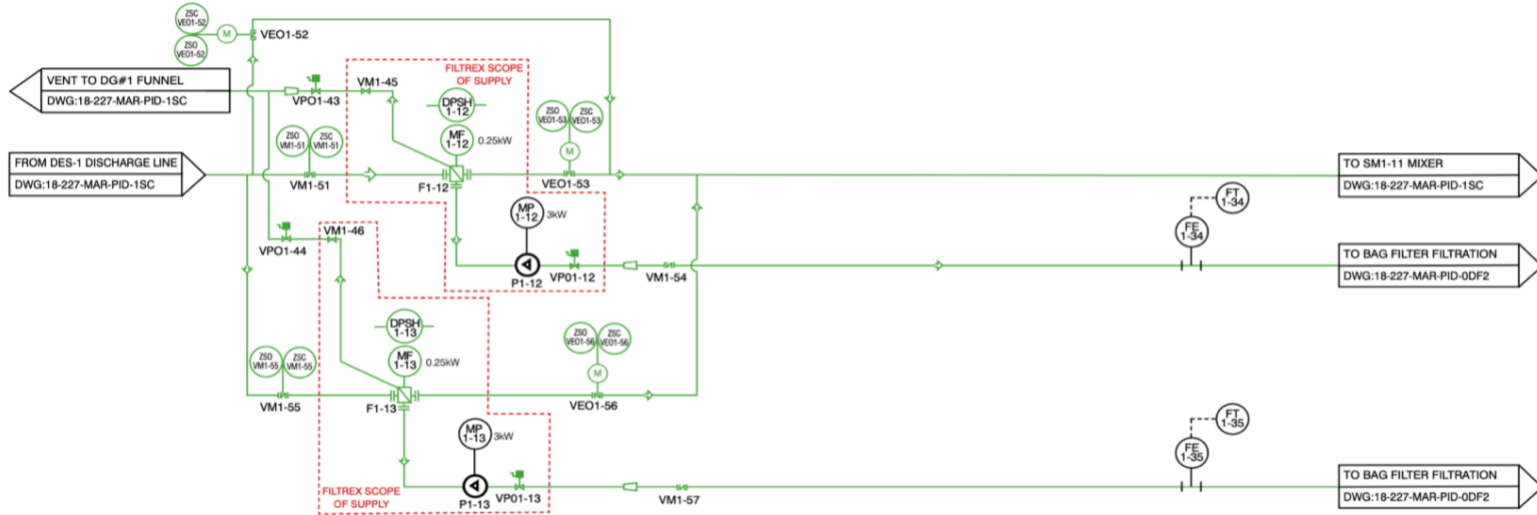
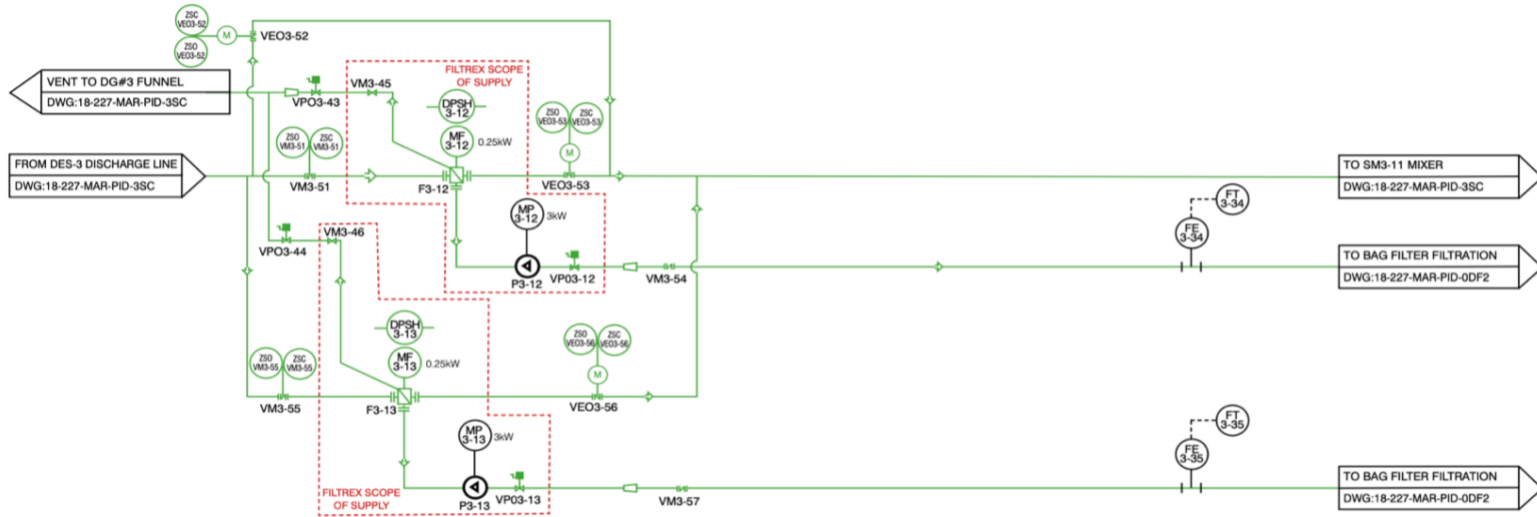


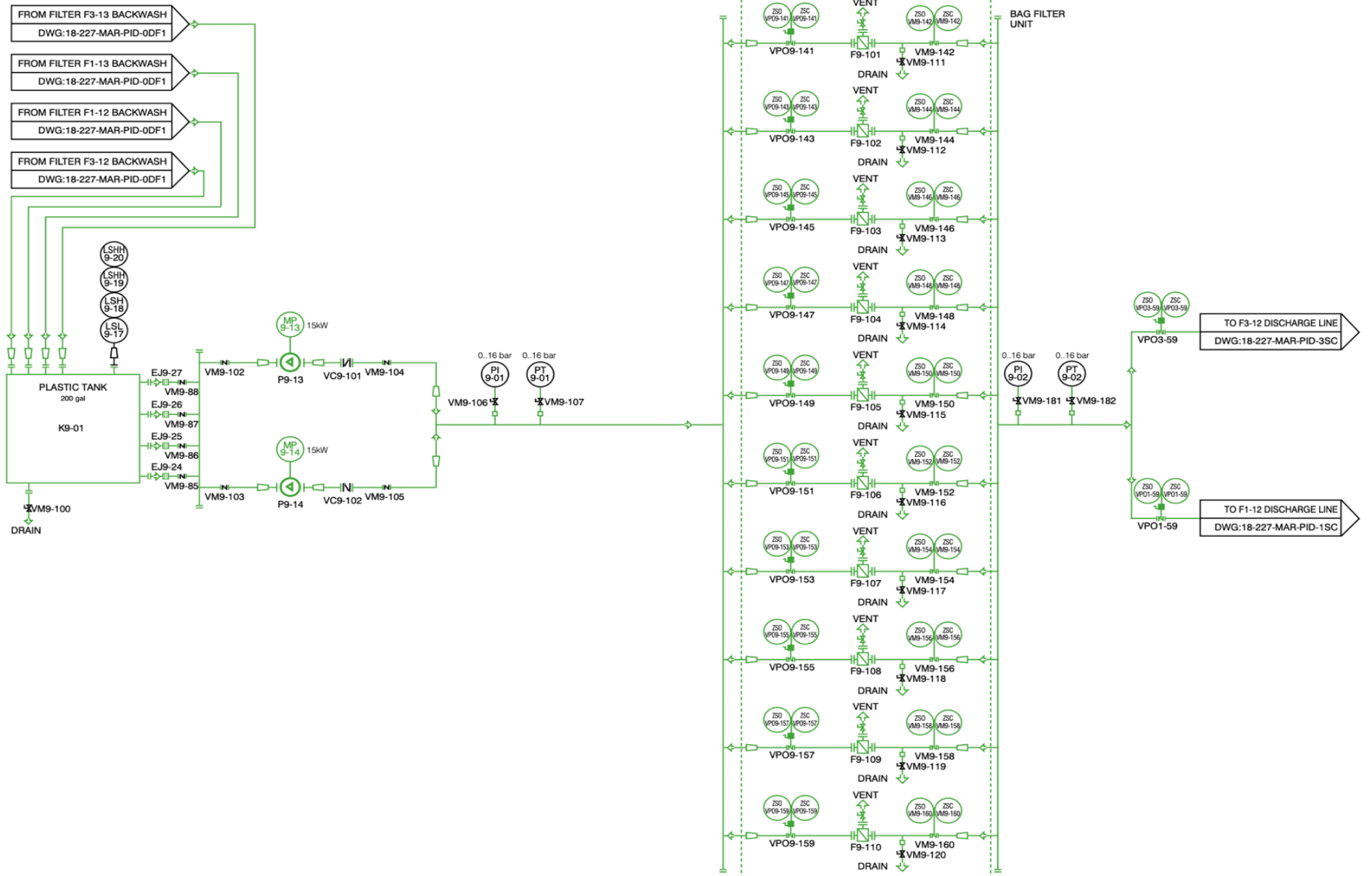
**ANEXO IX - ESQUEMAS P&ID CORRESPONDENTES À INSTALAÇÃO DA  
TORRE DE LAVAGEM NO DG#1 DO NAVIO EM ESTUDO**

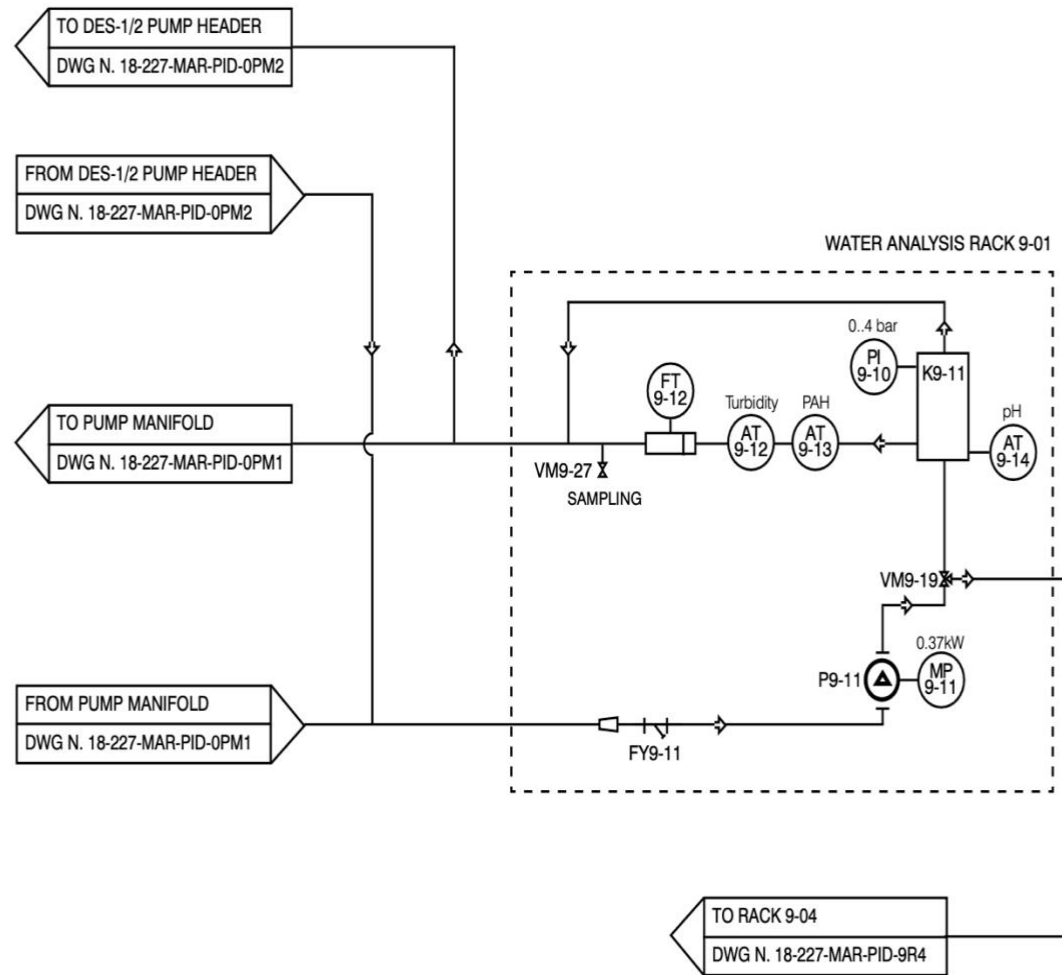


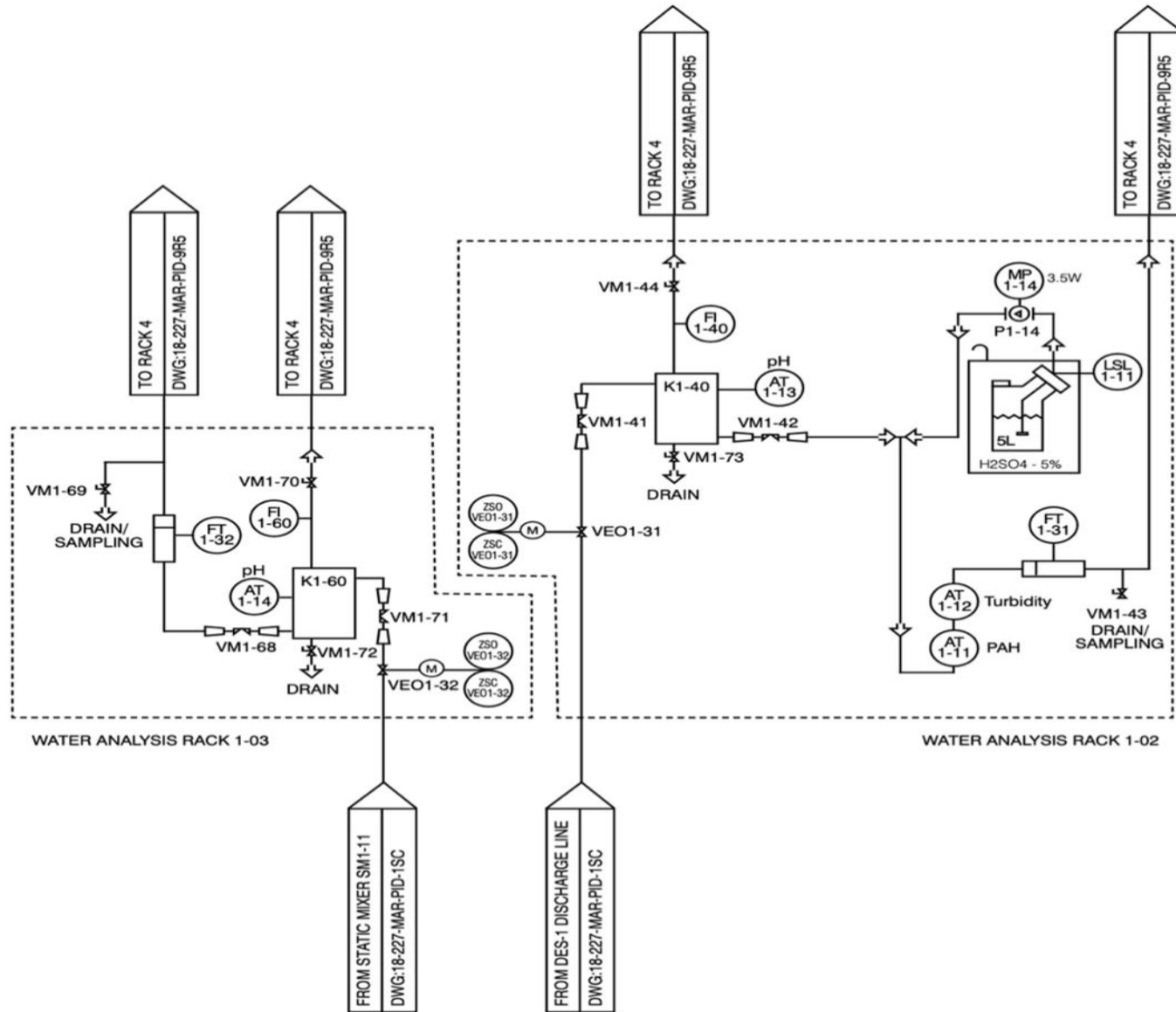


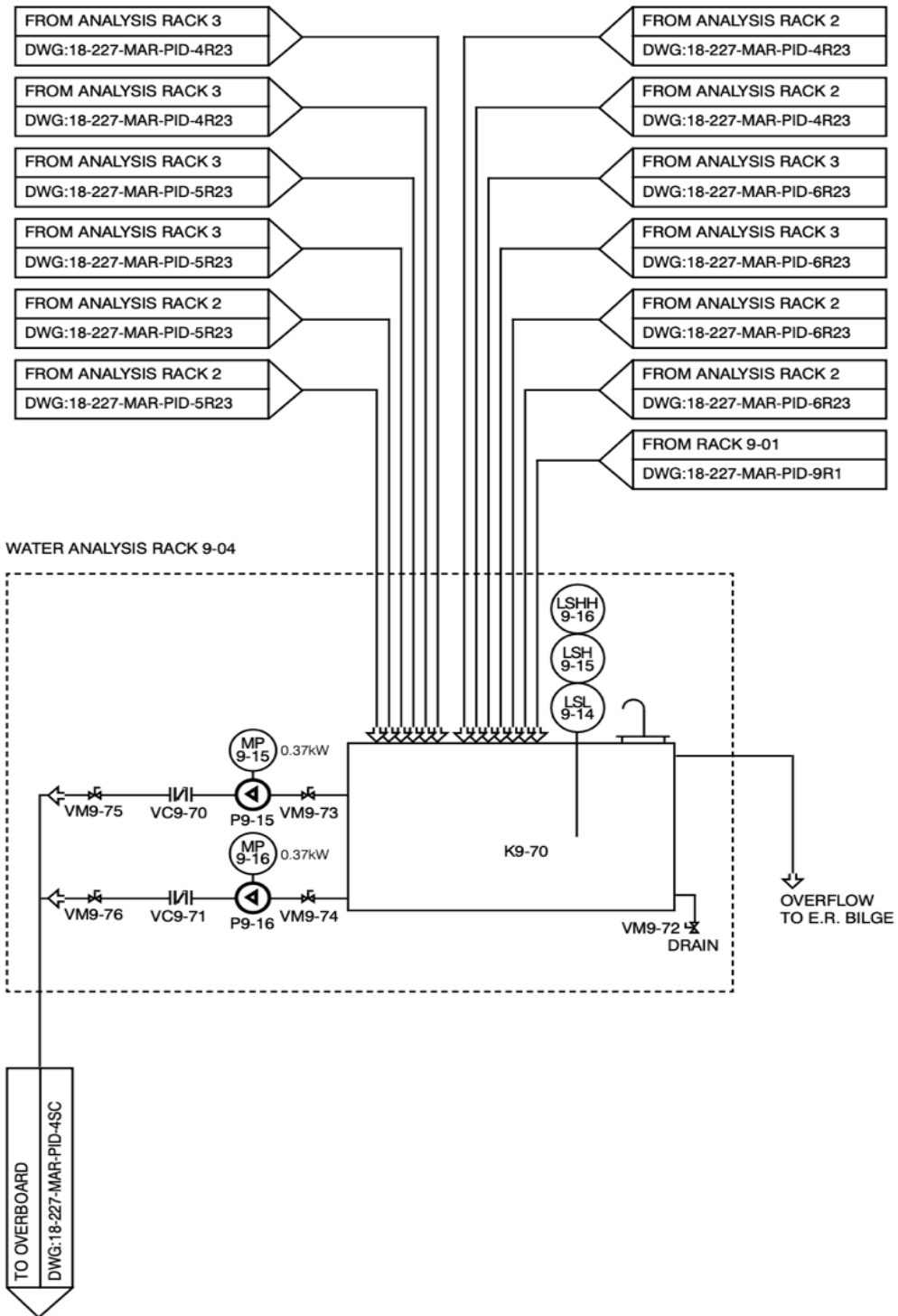












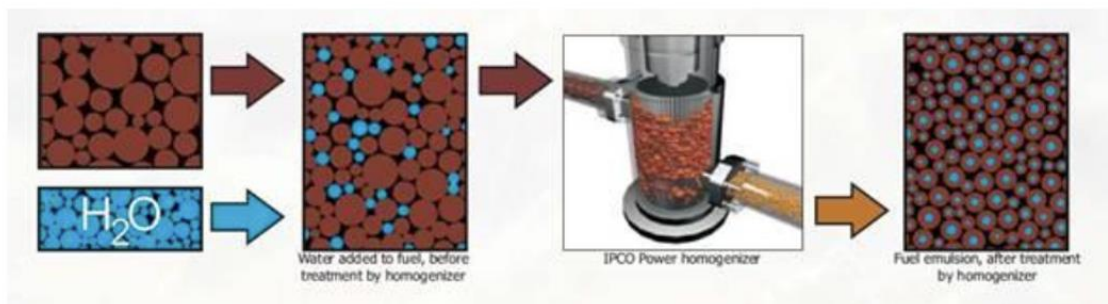


**ANEXO X - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO DE  
INJEÇÃO DE COMBUSTÍVEL**

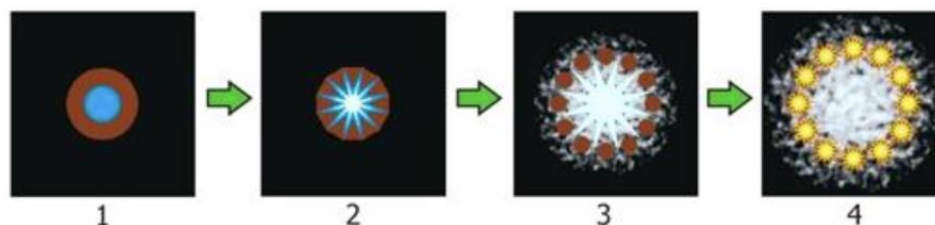


### **Combustion Improvement**

IPCO Power's **FID Injector** is a combustion improvement system designed to create a stable "water in fuel" emulsion. The system is installed before the mixing tank. The implementation of emulsified fuel significantly enhances fuel atomization and distribution in the combustion chamber. This results in more effective combustion, lower fuel consumption and a reduction of NO<sub>x</sub>, HC and PM pollutants, while the engine's combustion chambers, pistons, exhaust system and lube oil will stay much cleaner.



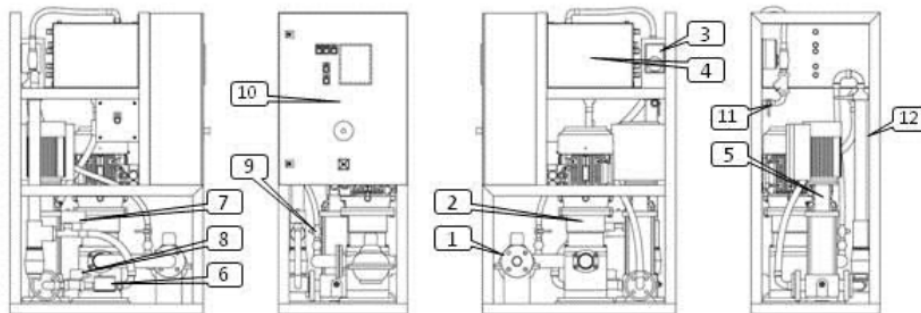
Schematic representation of combusting fuel emulsion:



1. Water in fuel emulsion as it enters the cylinder
2. When the air/Fuel mixture is compressed in the combustion chamber, the water starts to evaporate
3. The water turns to steam, in this process the fuel droplets are atomized thoroughly
4. The forming of steam and the thoroughly atomized fuel causes a better and more complete combustion of the fuel (more surface area of the fuel and more oxygen from the steam). The steam also reduces the peak flame temperature, thus reducing NO<sub>x</sub>

### 3. The Fuel Improvement Device

The FID Injector consist of the following basic parts:



1. Fuel flow meter (located outside frame)
2. Fuel Improvement Device
3. Fresh water valve
4. fresh water tank
5. Frequency controlled water pump
6. water flow meter
7. water regulating valve
8. water solenoid
9. Water injecting nozzle
10. Control panel
11. Water supply
12. Water heater

The full fuel flow must pass through the FID Injector, the fuel flow is measured by a flow meter (1) and is constantly monitored (10)

The fuel passes through the F.I.D. (2) which mixes the water in the fuel.

The amount of injected water is a percentage of the fuel flow, when the fuel flow changes, the water flow changes with it. The amount of water has an upper limit, a higher value then the upper limit will not be accepted by the program. This upper limit will be programmed, default is 20%.

Fresh water is stored in the fresh water tank (4). The level of the tank is regulated by a automatic fill-valve (3). The water pressure must be higher than the fuel pressure to inject it into the fuel. This is done by a frequency controlled pump (5). This pump brings the water pressure 2 bar higher than the fuel pressure. The flow of the high pressure water is measured by a flow meter (6) and a PI-controlled regulating valve (7) regulates the amount of water that is injected. There is also a solenoid (8) valve to make sure the water stops when the fuel flow is to low or the FID Injector is stopped.

The Fuel Improvement Devices have the following properties:



Displayed on the picture is the Reducer/Improver, the FID Injector has the same properties.

