

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Camila de Barros Lima Carreira



O ESTUDO DE COMBUSTÍVEIS MARÍTIMOS ALTERNATIVOS

Rio de Janeiro

2023

Camila de Barros Lima Carreira

O ESTUDO DOS COMBUSTÍVEIS MARÍTIMOS ALTERNATIVOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheira Química.

Orientadora: Prof. Dr.^a Yordanka Reyes Cruz

Rio de Janeiro

2023

CIP - Catalogação na Publicação

C314e Carreira, Camila de Barros Lima
Os Estudos de Combustíveis Marítimos Alternativos
/ Camila de Barros Lima Carreira. -- Rio de
Janeiro, 2023.
80 f.

Orientadora: Yordanka Reyes Cruz.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de
Química, Bacharel em Engenharia Química, 2023.

1. combustíveis marítimos. 2. combustíveis. 3.
transporte marítimo. 4. imo. I. Cruz, Yordanka
Reyes, orient. II. Título.

Camila de Barros Lima Carreira

O ESTUDO DOS COMBUSTÍVEIS MARÍTIMOS ALTERNATIVOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Química.

Aprovado em 19 de Julho de 2023.

Yordanka Reyes Cruz, Dr. ^a., UFRJ

Rayane Paiva, Dr. ^a., UFRJ

Luana Barros Furtado, Dr. ^a., UFRJ

Rio de Janeiro
2023

Dedico esse trabalho a Camila de 7 anos atrás que escolheu ser Engenheira, a Camila criança que um dia quis ser cientista. Aos meus pais e minha irmã que nunca me deixaram desistir. Nós conseguimos.

AGRADECIMENTOS

Impossível começar esses agradecimentos ser agradecer a Ele, a razão de tudo: Deus. Pela coragem para seguir firme no meu propósito, com saúde e esperança de um futuro melhor. Aos meus maiores apoiadores, meus pais: Carla e Luiz. Palavras não são suficientes para agradecer tudo que vocês fizeram e fazem, por mim. Pelo apoio, mesmo nos momentos mais difíceis, por terem me ensinado que a educação é o que nos leva longe e por todo amor.

A minha irmã, Clarinha, pelas tantas gargalhadas, a companhia maravilhosa nos corredores da UFRJ, almoços, engarrafamentos, jogos. Foi maravilhoso viver boa parte da minha graduação com você pertinho de mim.

Ao meu amor, Pedro, por toda compreensão e zelo durante todo esse período. Seu abraço no final do dia me revigora, seu apoio me faz seguir em frente e seu amor me torna mais feliz.

Aos meus avós, Clarice e Antônio, pelas muitas orações e almoços quando eu ainda fazia pré vestibular. E a todos os meus familiares, de sangue e de coração, que sempre torceram enormemente por mim e vibraram com as minhas conquistas.

Ao melhor período que essa universidade já viu, meu amado 16.2, sem vocês teria sido impossível chegar até aqui. Adryena, de concorrente a companheira de trânsito, Bia, juntas desde antes de chegarmos na UFRJ, Karine, minha velhinha favorita, José Luiz, meu melhor amigo desse TCC, Marcella, a melhor história de rivais para amigas que já vivi, Gustavo, o aquariano mais incrível, depois de mim, Amanda, pelos incontáveis almoços e desabafos no estágio, Paulo, pelas piadas, Bretas, pelos surtos, Giovana, pela meiguice: muito obrigada.

A Associação Atlética Acadêmica Escola Politécnica, em especial a diretoria 20/21: sobrevivemos. Obrigada pelos aprendizados, vitórias, que foram muitas, e amizades. Vocês são eternos no meu coração. AHU!

As minhas grandes amigas: Suellen, Mariana, Giovanna, Myllena, Camila e Thayná, que sempre se fizeram presentes na minha vida e me apoiaram em cada decisão.

Aos meus orientadores de iniciação científica Rayane, Adriana e Romildo, agradeço a oportunidade e confiança. Ao NUMATS e pelos 2 anos felizes vividos com todos, obrigada.

Agradeço a minha orientadora Yordanka por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa e por todo apoio e compreensão.

A todos os meus professores do curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro pela excelência da qualidade técnica de cada um.

A todos que cruzaram meu caminho ao longo desses 7 anos de graduação, me tiraram um sorriso, me ensinaram algo e contribuíram direta ou indiretamente para realização desse trabalho.

“A tribulação produz perseverança; a perseverança, experiência, e a experiência a esperança. E a esperança não nos decepciona, porque Deus derramou seu amor em nossos corações, por meio do Espírito Santo que ele nos concedeu.” (Romanos, capítulo 5, versículos 3 a 5)

RESUMO

De Barros Lima Carreira, Camila. **O Estudo de Combustíveis Marítimos Alternativos**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Os transportes marítimos dependem de combustíveis fósseis não-renováveis para sua operação. Esses combustíveis são altamente poluentes, com emissões elevadas de gases de efeito estufa, e são recursos finitos. Esses aspectos levantam preocupações sobre a possibilidade de escassez desses combustíveis no futuro próximo. No entanto, cada vez mais se reconhece a importância de proteger o meio ambiente e realizar uma transição para fontes de energia mais sustentáveis. Portanto, torna-se essencial encontrar alternativas de combustíveis renováveis para uso em navios. Além de uma nova legislação, a IMO 2020, que exige mudanças no teor de enxofre a serem emitidos. Neste cenário, o gás natural liquefeito, o etanol, o metanol, o biodiesel, a amônia e o hidrogênio surgem como alternativas para este problema, uma vez que são menos poluentes que os combustíveis advindos do petróleo, podendo ser produzidos a partir de resíduos de outros processos. Desponta também a possibilidade de uso de dispositivos scrubbers, que purificam gases, ou a mudança de combustível para um, ainda fóssil, porém de menor emissão de teor de enxofre, caso do diesel marítimo. O objetivo proposto no presente trabalho é realizar um mapeamento das diferentes qualidades de combustíveis que podem ser utilizadas em embarcações e de propostas que diminuam as emissões de gases poluentes. Dessa forma, foi possível avaliar como é feito o processo de conversão para a utilização dos combustíveis alternativos nos navios. Ao final, foi verificado que existem estudos propondo e avaliando novos tipos de combustíveis marítimos, cujas fontes de energia são alternativas, além de pesquisas que justificam seus usos, vantagens e desvantagens.

Palavras-chave: Transportes marítimos. Organização Internacional Marítima. Combustíveis marítimos. Combustíveis alternativos.

ABSTRACT

De Barros Lima Carreira, Camila. **O Estudo de Combustíveis Marítimos Alternativos**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Maritime transport depends on non-renewable fossil fuels for its operation. These fuels are highly polluting, with high greenhouse gas emissions, and are finite resources. These aspects raise concerns about the possibility of shortages of these fuels in the near future. However, there is increasing recognition of the importance of protecting the environment and making a transition to more sustainable energy sources. Therefore, it becomes essential to find renewable fuel alternatives for use in ships. In addition to new legislation, the IMO 2020, which requires changes in the sulfur content to be issued. In this scenario, liquefied natural gas, ethanol, methanol, biodiesel, ammonia, and hydrogen emerge as alternatives to this problem, since they are less polluting than fuels derived from petroleum, and can be produced from residues from other processes. Also emerging is the possibility of using scrubber devices, which purify gases, or changing fuel to one, still fossil, but with lower sulfur emissions, as is the case with marine diesel and LFSO. The objective proposed in the present work is to carry out a mapping of the different qualities of fuels that can be used in vessels and of proposals that reduce the emissions of polluting gases. In this way, it was possible to assess how the conversion process for the use of alternative fuels on ships is carried out. In the end, it was verified that there are studies proposing and evaluating new types of marine fuels, whose energy sources are alternative, in addition to research that justifies their uses, advantages and disadvantages.

Keywords: Sea transportation. International Maritime Organization. Marine fuels. Alternative fuels.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Dados da evolução do transporte aquaviário.	16
Figura 2 - Crescimento do transporte marítimo mundial em milhões de toneladas.	20
Figura 3 - Origem dos óleos combustíveis marítimos.	22
Figura 4 - Principais diferenças entre Bunker e Diesel Marítimo.	23
Figura 5 - Principais aplicações dos combustíveis marítimos.	24
Figura 6 - Demanda mundial de combustível marítimo de 2015 a 2024.	25
Figura 7 - Principais derivados de petróleo (produtos da destilação atmosférica e a vácuo do petróleo) – Refino de Petróleo.	27
Figura 8 - Demanda mundial de petróleo por produto.	28
Figura 9 - Produção primária de energia no Brasil.	29
Figura 10 - Derretimento das calotas polares.	33
Figura 11 - Gases resultantes da queima do bunker.	34
Figura 12 - Gráfico do percentual de gases de efeito estufa em relação aos principais setores industriais.	35
Figura 13 - Fachada da Organização Marítima Internacional com as bandeiras de todos os Estados membros.	37
Figura 14 - Limite máximo do teor de enxofre nos combustíveis marítimos.	40
Figura 15 - Atuais ECAs em vigor.	40
Figura 16 - Limite máximo do teor de enxofre nos combustíveis marítimos até 2025.	41
Figura 17 – Mapa dos países que fazem parte da IMO.	42
Figura 18 - Consumo de combustível marítimo: a) mundial; b) europeu.	44
Figura 19 - - Componentes básicos de um scrubber.	48
Figura 20 – Vantagens e desvantagens dos scrubbers.	49
Figura 21 - Previsibilidade de navios equipados com scrubbers entre 2017 e 2024.	50
Figura 22 - Vantagens e desvantagens do LSFO (Bunker 0,5%).	51
Figura 23 - Vantagens e desvantagens do diesel marítimo (DMA/MGO).	52
Figura 24 - Vantagens e desvantagens do GNL.	55
Figura 25 - CMA CGM Jacques Saade, maior navio cargueiro do mundo movido a GNL.	56
Figura 26 - Demanda de GNL como combustível marítimo, 2018-2024 (mil barris/dia).	56
Figura 27 - Estrutura da sacarose.	57
Figura 28 – Estrutura do amido.	58

Figura 29 - Esquema estrutural simplificado das fibras do material lignocelulósicas.	59
Figura 30 - Transesterificação de triglicerídeos com metanol para glicerol e ésteres metílicos para a produção de ésteres metílicos de ácidos graxos.....	62
Figura 31 - Rotas para a produção de H ₂	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Efeitos nocivos dos principais poluentes atmosféricos a saúde.	31
Tabela 2 - Anexos técnicos da MARPOL 73/78.	39
Tabela 3 - Comparativo de emissões entre gás natural, óleo e carvão.	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CBIE	Centro Brasileiro de Infraestrutura
IMO	Organização Internacional Marítima
CO ₂	Dióxido de Carbono
SO _x	Óxido de Enxofre
NO _x	Óxido de Nitrogênio
HFO	Óleo combustível pesado
MDO	Óleo diesel marítimo
MGO	Óleo de gás marinho
CNT	Confederação Nacional do Transporte
OCM	Óleos combustíveis marítimos
MF	Marine Fuel
VLSFO	Very Low Sulfur Oil
DMA	Diesel marítimo
DMB	Diesel marítimo
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
RANP	Resolução da ANP
ISO	Organização Internacional de Normalização
GEE	Gases do Efeito Estufa
PTS	Partículas Totais em Suspensão
MP10	Partículas Inaláveis
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
SO ₂	Dióxido de Enxofre
CO	Monóxido de Carbono
O ₃	Ozônio
CFCs	Cloro Fluoretos Carbonos
CH ₄	Metano
N ₂ O	Óxido Nitroso
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
UE	União Europeia
ONU	Organização das Nações Unidas

IMC Organização Consultiva Marítima Intergovernamental

MARPOL Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios

PM Material Particulado

ECAs Áreas de controle de emissão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	15
1.2	JUSTIFICATIVA.....	16
1.3	OBJETIVOS	17
1.3.1	Objetivo Geral.....	17
1.3.2	Objetivos Específicos	18
1.4	Estrutura do trabalho	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	OS TIPOS DE COMBUSTÍVEIS MARÍTIMOS UTILIZADOS PELO SETOR DE NAVEGAÇÃO E SUA DEMANDA ATUAL	19
2.1.1	O setor de transporte marítimo	19
2.1.2	Os atuais tipos de combustíveis marítimos.....	21
2.1.3	Demanda atual do setor de navegação.....	24
2.2	IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA NOS COMBUSTÍVEIS EM ESTUDO.....	29
2.2.1	Poluentes Atmosféricos x Gases do Efeito Estufa (GEE)	30
2.2.2	Os combustíveis marítimos e seus poluentes	34
2.3	AS PRINCIPAIS REGULAMENTAÇÕES DO TRANSPORTE MARÍTIMO.....	36
2.3.1	Organização Marítima Internacional, IMO.....	36
2.3.2	Outras instituições e protocolos	42
3	METODOLOGIA	45
3.1	PROCEDIMENTOS TÉCNICOS	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	NOVAS PROPOSTAS PARA TRANSPORTES MARÍTIMOS	47
4.1.1	Scrubbers	47
4.1.2	Mudança no consumo para combustíveis de baixo teor de enxofre – Diesel Marítimo (DMA/MGO) e Low Sulfur Fuel Oil (LSFO).....	50
4.2	NOVAS QUALIDADES DE COMBUSTÍVEIS MARÍTIMOS: COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS	53
4.2.1	GNL	53
4.2.2	Etanol.....	56
4.2.3	Metanol	60
4.2.4	Biodiesel	61
4.2.5	Amônia.....	64
4.2.6	Hidrogênio	65

5	CONCLUSÃO.....	68
6	RECOMENDAÇÕES	70
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Aproximadamente 70% da superfície da Terra é coberta por água, o que torna o mar essencial para a existência humana e suas interações sociais. Ele desempenha um papel fundamental no desenvolvimento econômico e como uma fonte de recursos. À medida que a população humana continua a crescer, espera-se que a dependência do mar nesses aspectos aumente.

Quando se trata de desenvolvimento econômico, há diversas razões que levam os países a se envolverem no comércio internacional. Por exemplo, eles podem buscar recursos naturais escassos ou abundantes, ou buscarem atualização tecnológica, entre outros fatores. Mas, para que o comércio internacional ocorra, depende-se de várias modalidades de transporte, sendo o transporte marítimo o mais importante deles.

Sendo assim, o transporte marítimo desempenha um papel fundamental no comércio entre nações, sendo essencial para o comércio transoceânico devido à sua capacidade de transporte de grandes volumes de carga, baixo custo e eficiência. Ele desempenha um papel importante tanto como uma atividade independente quanto como um elo nas complexas cadeias logísticas que envolvem diversos modos de transporte.

Porém, os navios são responsáveis pela geração de diversos resíduos, incluindo poluentes atmosféricos, que têm impactos negativos no meio ambiente. De acordo com o Centro Brasileiro de Infraestrutura (CBIE), a maioria dos combustíveis utilizados nos sistemas de propulsão e auxiliares é derivada do petróleo, o que resulta nesses impactos.

Essa poluição é um obstáculo em todos os aspectos do desenvolvimento sustentável. Socialmente, ela reduz a qualidade de vida e as oportunidades. Economicamente, provoca instabilidade no mercado e diminui o número de empregos. Ambientalmente, causa alterações óbvias na fauna e flora, afetando o crescimento tanto marinho quanto terrestre.

Nos últimos 20 anos, surgiram preocupações cada vez maiores em relação à poluição ambiental e ao aquecimento global, o que tem impulsionado a busca por soluções alternativas ao consumo de petróleo (RENOTEC, 2020).

Consequentemente, sabendo que o comércio internacional, cuja base é o transporte marítimo, se encontra em um contexto energético dependente de combustíveis fósseis, a busca

por um cenário mais sustentável, com energia renovável e combustíveis alternativos, está cada vez mais forte.

1.2 JUSTIFICATIVA

Levando em consideração o atual cenário sobre os combustíveis marítimos, o interesse em realizar esse estudo surgiu mediante o fato de o setor de navegação mercante ser, atualmente, um dos principais atores do comércio mundial, vide que é responsável por mais de 80% do comércio global de mercadorias, e ainda, no período de 2010 a 2021, conforme dados do Anuário Estatístico de Transportes, o transporte aquaviário obteve um crescimento de 3,3%, aumento possível de ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Dados da evolução do transporte aquaviário.



Fonte: Anuário Estatístico de Transporte, 2021.

Além do motivo apresentado, esse estudo é incentivado por questões econômicas e ambientais, através de estratégias como a implementação de regras para a redução da emissão de gases do efeito estufa pautadas nas reuniões da Organização Marítima Internacional (IMO). No ano de 2020, importante dizer, a IMO decidiu implementar um limite global de enxofre de 0,50% m/m (massa/massa), antes 3,5%, uma redução significativa. E ainda fruto de reuniões da IMO, existe, atualmente, um plano de redução de 30% do consumo de energia nos navios até 2025.

Os problemas relacionados aos combustíveis marítimos são diversos e vão desde ao elevado consumo de combustíveis fósseis até a enorme emissão de gases poluente ocasionadores do efeito estufa.

Segundo dados do IEA (HSIEH, C. C. FELBY, C., 2017), as viagens marítimas internacionais têm uma capacidade de carga de aproximadamente 1,2 bilhão de toneladas de frete, no valor de aproximadamente US \$7 trilhões. O setor consome mais de 330 milhões de toneladas de derivados de combustíveis todos os anos, sendo cerca de 80% a 85% com elevado teor de enxofre. Além disso, estima-se que o transporte por via marítima chega a ser responsável por até 3% das emissões globais de CO₂, até 9% de SO_x e até 15% das emissões de NO_x.

O óleo combustível pesado (HFO) é o principal combustível usado pelas embarcações de águas profundas e é um combustível que se caracteriza por uma viscosidade muito alta e, principalmente, um alto teor de enxofre, o que justifica a grande porcentagem de emissão de enxofre. Já os combustíveis mais refinados, são o óleo diesel marítimo (MDO) e o óleo de gás marinho (MGO), que se aplicam em embarcações menores e/ou de águas costeiras, e, além disso, possuem níveis mais baixos de viscosidade e teor de enxofre.

Dessa forma, o presente trabalho parte da necessidade de entender como o estudo sobre combustíveis marítimos alternativos pode impactar direta ou indiretamente o comércio internacional, aquele que tem como base o transporte marítimo, analisando sua viabilidade, e a população mundial, trazendo um cenário mais sustentável para os navios, com energia renovável e combustíveis alternativos como vetores relevantes para a geração de potência em navios e, conseqüentemente, diminuindo a emissão de gases poluentes.

1.3 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste TCC.

1.3.1 Objetivo Geral

O conteúdo deste trabalho pretende agregar na área, tendo como objetivo principal discutir os estudos sobre combustíveis marítimos alternativos, identificando abordagens tecnológicas inovadoras a fim de promover o desenvolvimento sustentável e a redução das emissões de carbono.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar os tipos de combustíveis marítimos utilizados atualmente pelo setor de navegação e os principais resíduos gerados;
- Conhecer as principais regulamentações que envolvem o transporte marítimo;
- Realizar um levantamento dos tipos de combustíveis marítimos alternativos existentes e em estudo, verificando sua possibilidade de uso e qualidade.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é constituído de 7 tópicos. No primeiro, tem uma introdução, com uma contextualização do trabalho, a justificativa, onde são descritas as principais razões que motivaram a realização do estudo, bem como os objetivos gerais e específicos do trabalho.

No segundo tópico, mostra-se o referencial teórico, onde são apresentados os combustíveis marítimos atualmente utilizados pelo setor, como também a demanda atual desses e as suas respectivas emissões de poluentes. Já o tópico 3 aborda sobre a metodologia empregada para execução deste trabalho.

Por sua vez, o quarto tópico apresenta resultados da realização do mapeamento do cenário das novas opções de combustíveis marítimos, agora alternativos e com menor índice de emissão de gases. Na sequência, o tópico 5 expõe as conclusões obtidas ao longo do trabalho e segue para o tópico 6, onde se retrará as sugestões para futuros trabalhos.

Por fim, no tópico 7, é apresentada uma relação abrangente de todas as fontes de pesquisa, referências, utilizadas no estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 OS TIPOS DE COMBUSTÍVEIS MARÍTIMOS UTILIZADOS PELO SETOR DE NAVEGAÇÃO E SUA DEMANDA ATUAL

2.1.1 O setor de transporte marítimo

Conforme mencionado previamente na introdução, o transporte marítimo desempenha um papel estratégico e essencial no comércio global. Devido ao avanço da industrialização e à abertura das economias nacionais ao longo do tempo, essa indústria tem experimentado uma tendência contínua de crescimento no volume total de comércio.

Existe uma correlação entre o crescimento do transporte marítimo e as grandes navegações durante o contexto de expansão do século XV. Foi nessa época que se percebeu a importância dos oceanos e houve um impulso significativo no desenvolvimento dos navios.

Nos últimos decênios, o transporte marítimo tem experimentado um crescimento proporcional ao aumento da população mundial e, conseqüentemente, da demanda por mercadorias. Além disso, as economias emergentes em escala global continuam a aumentar sua necessidade de matérias-primas, produtos intermediários e produtos acabados à medida que seu padrão de vida se eleva, sendo que esses produtos geralmente são transportados por via marítima.

O transporte aquaviário abrange duas formas de navegação: a navegação interior, ou cabotagem, que utiliza hidrovias navegáveis dentro de um país, e o transporte marítimo, que engloba as viagens de longo curso, cujo, por sua vez, é realizado entre portos de diferentes países.

No cenário atual, aproximadamente 30 mil embarcações são responsáveis pelo transporte de quase seis bilhões de toneladas de mercadorias no comércio internacional. O tráfego marítimo global é categorizado de acordo com o tipo de carga, sendo que os graneis líquidos correspondem a 36% do total transportado, os graneis sólidos a 36,5% e a carga geral a 27% (SANDER MAGALHÃES LACERDA, 2004).

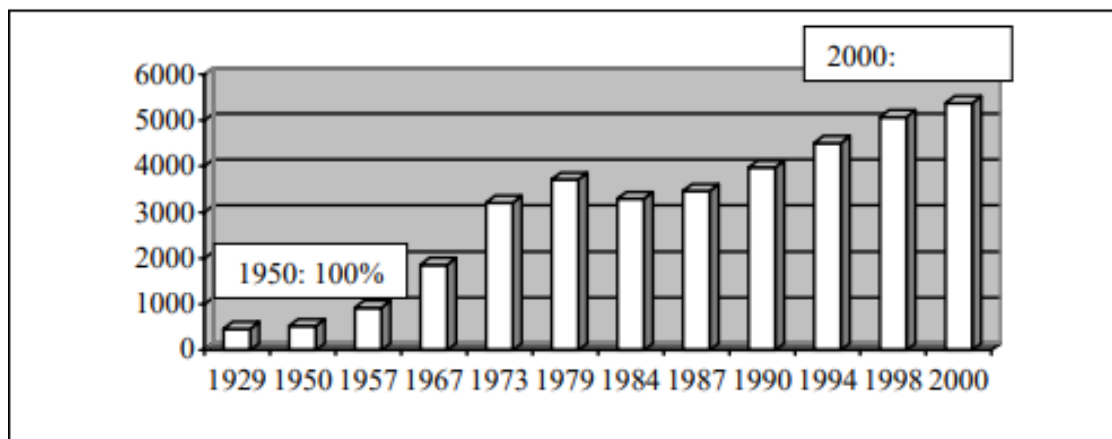
Poucas mercadorias representam uma parcela significativa, cerca de 60%, do volume total do comércio internacional. Essas mercadorias incluem petróleo e seus derivados, minério de ferro, bauxita, alumina, fosfatos, grãos agrícolas e carvão. Conhecidas coletivamente como graneis, essas mercadorias se destacam por seu grande volume de movimentação e baixa densidade de valor.

Sendo assim, pode-se dizer que o transporte aquaviário oferece diversas vantagens, como a capacidade de transportar grandes volumes de carga com custos reduzidos. Porém, esse modelo não é caracterizado por sua agilidade, já que depende de condições naturais para operar de forma eficiente, como a vazão dos rios, por exemplo (CNT, 2017).

Uma vez que uma das vantagens do transporte marítimo é a capacidade de transportar cargas volumosas, segundo Kumar e Hoffman (2002), o volume do transporte projetado para 2002 obedecia a seguinte distribuição (em toneladas métricas): transporte aéreo com 0,20%, outros com 34,37%, e o transporte marítimo com 65,43%.

A importância do modal marítimo fica clara quando comparados os dados referentes à carga transportada por navios no mundo, no período de 1929 a 2000, conforme a Figura 2.

Figura 2 - Crescimento do transporte marítimo mundial em milhões de toneladas.



Fonte: Musso, 2004.

Já no Brasil, segundo dados do Anuário da Confederação Nacional do Transporte (2022), houve um aumento de 5,2% de cargas movimentadas nas instalações portuárias brasileiras em 2021, em relação a 2020. Em números totais, foram 1,21 bilhão de toneladas de cargas movimentadas.

Além disso, ainda segundo dados do Anuário CNT do Transporte (2022), o aumento para cargas movimentadas em longo curso foi de 5,7% e na cabotagem de 6,3%, ambos em relação a 2020.

Percebe-se, então, que o transporte marítimo se sobressai como um dos principais meios de transporte de cargas atualmente, chegando a superar o transporte terrestre e aéreo tanto em volume como ao longo da história. Isso se deve ao fato de esse tipo de transporte ser a opção mais econômica e eficiente em termos de consumo de combustível por tonelada, o que justifica a expectativa de expansão natural do setor no futuro.

Em termos de vantagens, pode-se listar então as seguintes relacionadas ao transporte aquaviário: A grande capacidade de carregamento, o menor consumo de combustível por tonelada transportada, o reduzido registro de acidentes e custos por tonelada/quilômetro, além do baixo custo com seguro.

Quando comparado com os meios de transporte rodoviário e aéreo, o marítimo é amplamente reconhecido como uma opção energeticamente eficiente e ecologicamente favorável. Devido à extensão dos oceanos, o transporte marítimo consome poucos recursos na movimentação de mercadorias e no consumo de combustível. Em outras palavras, é um modo de transporte de longa distância com uma demanda energética relativamente baixa.

Por essa razão, é considerado a forma de transporte comercial menos impactante para o meio ambiente em termos de emissões de CO₂. No entanto, diante da crescente demanda global por mercadorias, é crucial que as emissões provenientes do setor de navegação sejam abordadas de forma central para garantir um crescimento sustentável a longo prazo.

Do ponto de vista ambiental, o transporte marítimo contribui com, aproximadamente, 2-3% das emissões globais de CO₂, sendo o setor de transporte com a menor taxa de emissão de CO₂ por tonelada de carga transportada por quilômetro. No entanto, em relação às emissões de óxido de enxofre (SO_x), o transporte marítimo representa de 4% a 9% do total global, e em relação às emissões de óxido de nitrogênio (NO_x), representa de 10% a 15%.

Se o comércio marítimo continuar a crescer no ritmo atual, sem alterações ou avanços técnicos, é esperado que a contribuição geral do setor para as emissões aumente significativamente. Portanto, é necessário buscar medidas e modificações para lidar com esses desafios ambientais e promover um transporte marítimo mais sustentável.

2.1.2 Os atuais tipos de combustíveis marítimos

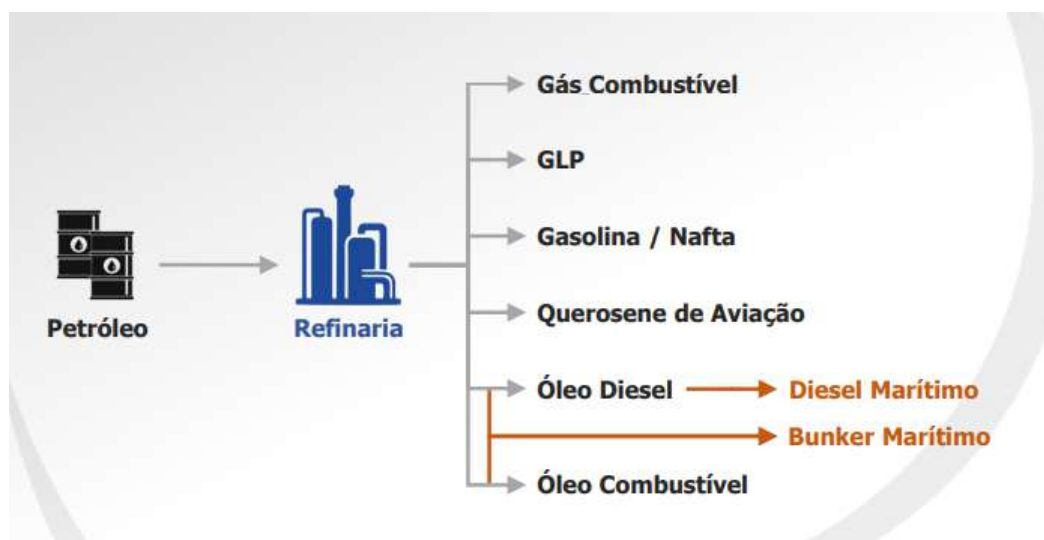
Os combustíveis utilizados em navios podem ser classificados em duas categorias: os residuais ou óleos combustíveis marítimos, que recebem a denominação de marine fuel (MF), Very Low Sulfur Fuel Oil (VLSFO) ou bunker, e os produzidos a partir das frações mais leves do processo de refino (gasóleos atmosféricos, majoritariamente) e que são chamados de diesel marítimo, DMA, DMB ou marine gasoil (MGO) (PETROBRAS, 2021).

Esses combustíveis costumam apresentar qualidade inferior, o que resulta em um custo mais baixo em comparação com os combustíveis utilizados no transporte rodoviário e aéreo. Os combustíveis marítimos são obtidos a partir dos destilados mais pesados das refinarias de

petróleo, contendo cadeias de carbono extremamente longas e poucos ou nenhum componente aromático.

Os óleos combustíveis marítimos são obtidos por meio da combinação de frações pesadas da destilação, também chamadas de resíduos, juntamente com outros óleos diluentes, conhecidos como óleos bunker ou MF (Petrobras, 2021). Embora possam ser produzidos a partir da mesma matéria-prima residual utilizada para os óleos combustíveis industriais, eles se distinguem por sua formulação e possuem especificações mais rigorosas. Na Figura 3 abaixo, pode-se observar a origem dos combustíveis.

Figura 3 - Origem dos óleos combustíveis marítimos.



FONTE: EPE, 2019.

Os óleos bunker, ou MF, são comercializados em diversos tipos, classificados de acordo com a viscosidade cinemática a 50 °C, desde o MF 10 até o MF 700 (Petrobras, 2021). Essas diversas faixas existem para atender às necessidades dos motores, com base nas temperaturas possíveis de se aquecer o óleo na instalação que o utiliza.

O bunker fuel é o principal combustível usado em embarcações marítimas e é também conhecido como óleo combustível pesado. Esse tipo de combustível é uma forma densa e viscosa de óleo residual que é obtido a partir do processo de refino do petróleo e é amplamente utilizado devido à sua disponibilidade e preço relativamente baixo (Petrobras, 2021). No entanto, ele contém altas concentrações de contaminantes, como enxofre e material particulado, o que contribui para a poluição atmosférica gerada pelos navios.

Por outro lado, óleo diesel marítimo, também conhecido como MGO ou DMA, possui requisitos de especificações diferentes dos óleos bunker, visto que a viscosidade cinemática e

a massa específica são inferiores às observadas para o MF 10 (Petrobras, 2021). Nesse caso, o combustível deve atender a propriedades como, por exemplo, o índice de cetano, estabilidade à oxidação e aparência.



O óleo diesel marítimo é uma variante do óleo diesel convencional, mas pode ter especificações e características específicas para atender às necessidades do transporte marítimo, ele é projetado para ser utilizado em motores marítimos a diesel, que são diferentes dos motores usados em automóveis. Esses motores são adaptados para operar em condições marítimas adversas e são projetados para fornecer energia aos sistemas de propulsão das embarcações.

Assim como o bunker fuel, o óleo diesel marítimo também contém enxofre e outras impurezas. No entanto, o teor de enxofre no óleo diesel marítimo geralmente é menor em comparação com o bunker fuel, embora ainda possa ser relativamente alto em algumas regiões do mundo.

Na mesma linha de raciocínio, com relação ao teor de enxofre, a ANP especificou, em consonância com a IMO, em suas RANP 52/2010 e RANP 789/2019, para os óleos residuais, um teor máximo de 0,5% de enxofre. E, para os destilados, a Resolução ANP nº 52 de 2010, especifica para 0,5%, enquanto a norma ISO 8217 indica que seja seguida a determinação da IMO, que, atualmente, também é de 0,5% (Petrobras, 2021).

Na Figura 4 abaixo, reporta-se, de maneira visual, as principais diferenças entre o bunker e o diesel marítimo.

Figura 4 - Principais diferenças entre Bunker e Diesel Marítimo.

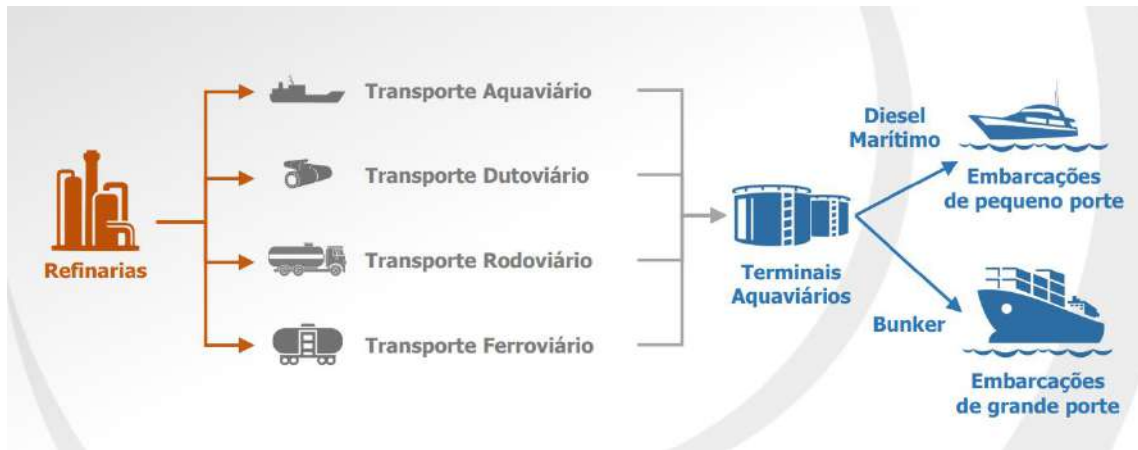
 Bunker ou Intermediate Fuel Oil (IFO) ou Óleo Combustível Marítimo (OCM)	 Diesel Marítimo (DMA) ou Marine Gasoil (MGO)
<ul style="list-style-type: none"> • Utilizado em motores principais, de grandes dimensões, nos sistemas de propulsão de navios de grande porte. • Possui requisitos de qualidade mais restritivos em comparação aos óleos combustíveis industriais. • São comercializados em diversos tipos e classificados de acordo com a viscosidade cinemática, como IFO 180 cSt, IFO 380 cSt e IFO 500 cSt (centiStokes). • Produzido a partir de formulações contendo principalmente frações pesadas da destilação de petróleo nas refinarias. • No Brasil, a Resolução ANP nº 52/2010 estabelece o limite máximo do teor de enxofre de 3,5% em massa para o óleo combustível marítimo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizado em motores principais, de propulsão, em embarcações de médio e pequeno porte, por exemplo, barcos de passeio e de transporte de passageiros. • Possui requisitos de qualidade diferentes do bunker, em particular, menor viscosidade cinemática e menor massa específica. • Produzido a partir das frações mais leves do processo de refino em comparação ao óleo combustível marítimo. • No Brasil, a Resolução ANP nº 52/2010 estabelece o limite máximo do teor de enxofre de 0,5% em massa para o diesel marítimo.

FONTE: EPE, 2019.

Quanto as principais aplicações, o bunker, ou MF, é utilizado em motores principais, de dimensões grandes, em navios de grande porte, enquanto o diesel marítimo é utilizado, majoritariamente em navios de pequeno e médio porte como barcos de passeio e de transporte

de passageiros (EPE, 2019). Na Figura 5, é possível ver a distinção na aplicação de cada um desses combustíveis.

Figura 5 - Principais aplicações dos combustíveis marítimos.



FONTE: EPE, 2019.

Desde o advento dos motores a diesel a bordo de navios no início do século XX, o óleo combustível pesado (HFO), ou residual, ou bunker oil, também referido como combustível de bancas, tem sido a opção preferida de combustível no setor de transporte marítimo. É, em outras palavras, aquilo que sobra por último no processo de destilação do petróleo.

2.1.3 Demanda atual do setor de navegação

Como já dito, os principais combustíveis marítimos são o bunker e o diesel marítimo. Sabendo que o setor de navegação é impulsionado pelo comércio global e pelo transporte de mercadoria, é justo dizer que esse setor tem uma expectativa de crescimento alta nos próximos anos, com o aumento da globalização.

Segundo dados da Empresa de pesquisa energética (2019), o consumo mundial de combustível marítimo deve crescer 1,7% ao ano entre 2018 e 2024. Nos últimos 10 anos, esse consumo cresceu 2,5% ao ano, refletindo o crescimento do comércio internacional e ainda, entre 2015 e 2018, a participação dos tipos de combustível marítimo no consumo mundial foi de 80% do tipo bunker e 20% do tipo diesel marítimo.

Figura 6 - Demanda mundial de combustível marítimo de 2015 a 2024.



FONTE: EPE, 2019.

Sendo assim, conforme se percebe na Figura 6 acima, a demanda por combustíveis de navegação se torna cada vez maior e, se torna essencial avaliar a sua origem, a fim de verificar a sua disponibilidade no mercado. Para evidenciar a origem dos combustíveis marítimos, portanto, precisa-se, primeiro, entender o que são combustíveis.

Combustível é um material ou substância que, quando queimado ou oxidado, libera energia na forma de calor e/ou luz, que é utilizado para fornecer energia em diversos processos, como em motores de combustão interna, aquecimento, geração de eletricidade, entre outros.

Existem diferentes tipos de combustíveis, sendo os mais comuns os derivados do petróleo, como gasolina, diesel, querosene e óleo combustível. Além disso, há também os combustíveis naturais, como o carvão mineral e o gás natural, que são amplamente utilizados para geração de energia.

A forma de obtenção dos combustíveis pode ser de fontes não renováveis ou renováveis. Os combustíveis renováveis são obtidos de fontes naturais que são continuamente renovadas ao longo do tempo. Esses combustíveis têm um menor impacto ambiental e contribuem para a redução das emissões de gases de efeito estufa (Renovabio, 2023).

As principais fontes de combustíveis renováveis são a energia solar, a energia eólica, a biomassa, a energia hidrelétrica e a energia das marés. Essas fontes de combustíveis renováveis

desempenham um papel importante na transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável (EPE).

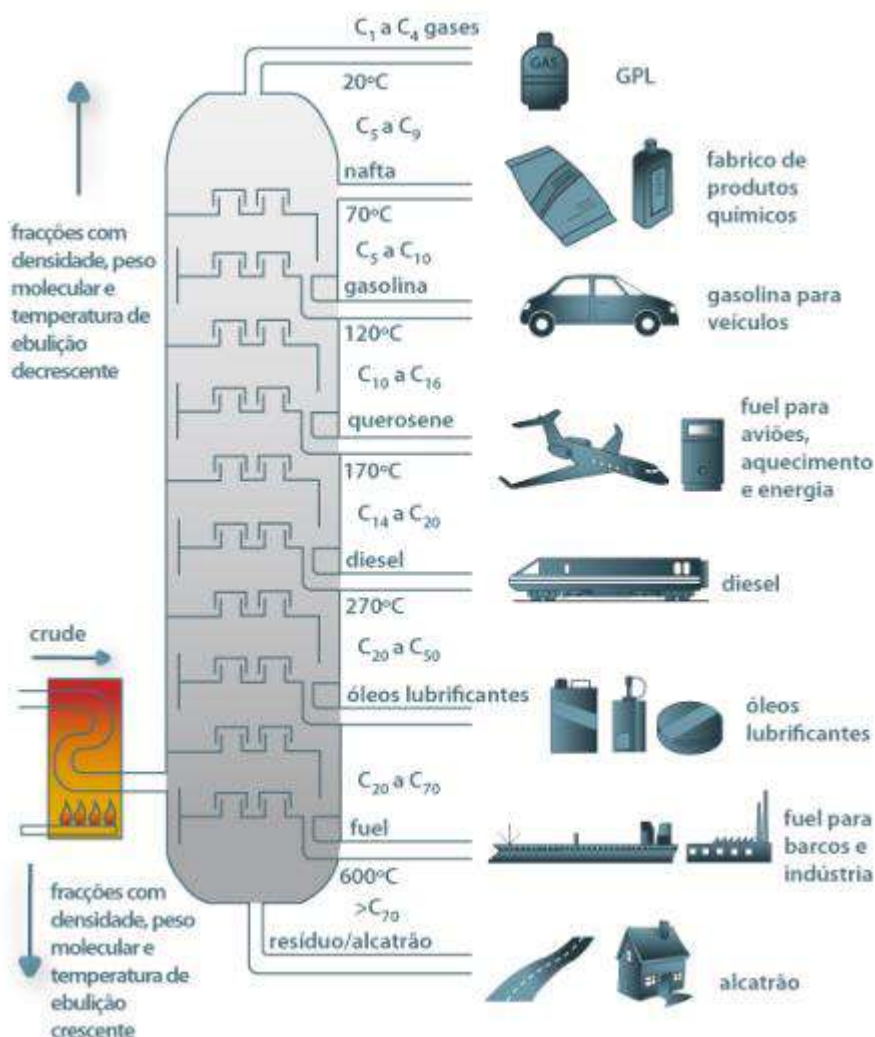
Já os combustíveis não renováveis são obtidos de fontes que são esgotáveis e não podem ser renovadas em um curto período. Esses combustíveis são geralmente formados a partir de processos geológicos ao longo de milhões de anos, sendo a sua maioria provenientes de fontes fósseis, conhecidos como combustíveis fósseis (EPE).

Alguns exemplos de combustíveis não renováveis incluem o petróleo, carvão mineral, gás natural e urânio (EPE). Esse tipo de combustível é amplamente utilizado em todo o mundo devido à sua alta densidade de energia e facilidade de transporte e armazenamento. No entanto, seu uso tem impactos significativos no meio ambiente, como a emissão de gases de efeito estufa e a poluição do ar e da água. Além disso, esses recursos são limitados e sua exploração pode levar à degradação ambiental e a problemas de segurança energética.

Agora, com conhecimento das características dos tipos de combustíveis, é possível entender melhor sobre os combustíveis marítimos.

A produção do óleo bunker, também conhecido como óleo combustível pesado, envolve o processo de refino do petróleo (Petrobras). Durante esse processo, uma variedade de produtos derivados de petróleo é obtida, e os resíduos mais pesados são tratados e processados para se obter o óleo bunker, que é uma fração residual densa e viscosa que permanece após a extração de outros produtos mais leves, como a gasolina e o diesel, sendo possível de observar na Figura 7.

Figura 7 - Principais derivados de petróleo (produtos da destilação atmosférica e a vácuo do petróleo) – Refino de Petróleo.



FONTE: Adaptado de Silva, 2008.

O óleo bunker é composto por resíduos de petróleo que possuem alto teor de enxofre e outras impurezas.

A produção do diesel marítimo também ocorre nas refinarias de petróleo, onde, durante esse processo, o petróleo é separado em frações por destilação. O diesel é uma dessas frações obtidas, que possui um ponto de ebulição mais alto do que a gasolina, mas mais baixo do que o óleo bunker pesado. Além disso, ele é uma variante do diesel convencional, adaptado para ser utilizado como combustível em motores marítimos a diesel.

No caso específico do diesel marítimo, podem ser feitas modificações adicionais no processo de refino para atender às especificações necessárias para o uso em motores marítimos.

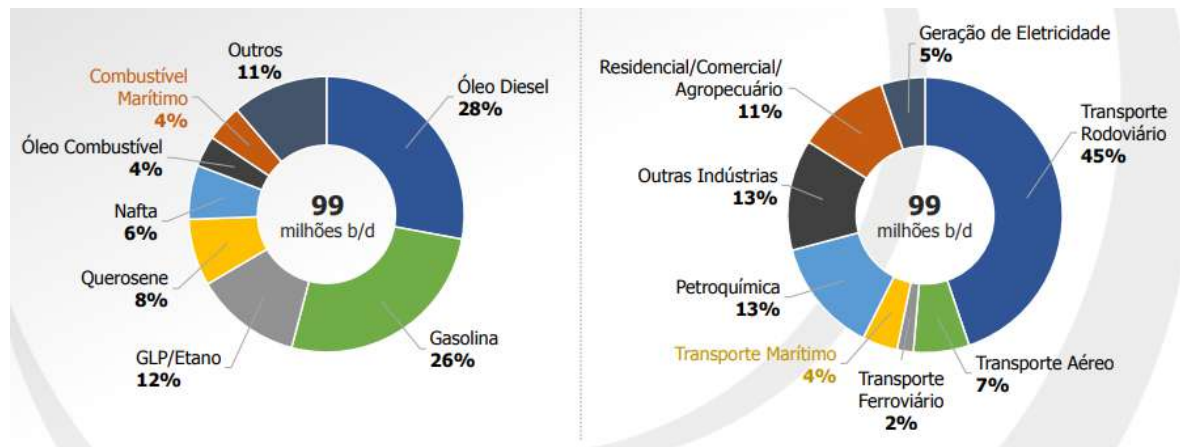
Essas modificações podem incluir a remoção de impurezas, como enxofre, para atender a regulamentações ambientais e reduzir as emissões de poluentes.

Com essas informações em mãos, é possível entender então que tanto o bunker quanto o diesel marítimo são provenientes do refino do petróleo, um combustível não renovável, fonte de combustível fóssil líquido encontrado em depósitos subterrâneos.

O petróleo é refinado para produzir uma variedade de produtos, como gasolina, diesel, querosene e óleo combustível. Ele é, atualmente, o combustível fóssil que possui a maior aplicação comercial, justamente porque, nas refinarias, ele passa por um processo em que são obtidos os seus derivados, já citados, e que possuem uma grande importância econômica.

De acordo com informações fornecidas pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), cerca de 31,5% da composição da matriz energética global é constituída por petróleo e seus derivados, tornando-os as principais fontes de energia do mundo. No caso da matriz energética do Brasil, essa proporção aumenta para 34,3%. Só os combustíveis marítimos representam cerca de 4% do consumo mundial de petróleo, conforme Figura 8.

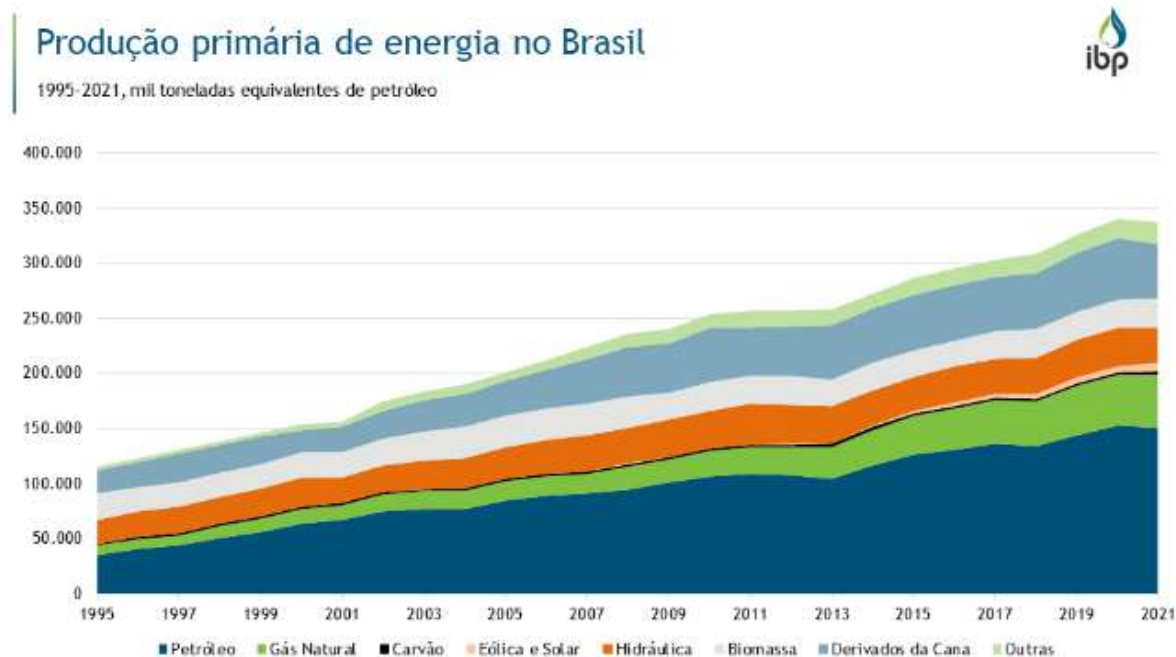
Figura 8 - Demanda mundial de petróleo por produto.



FONTE: EPE, 2019.

Porém, ainda que o petróleo tenha a maior aplicação comercial dos combustíveis fósseis, somente no Brasil, por exemplo, em 2021, segundo dados do IBP, esse tipo de combustível corresponde a 59% de participação na produção primária de energia, conforme observado na Figura 9, ele é um combustível não renovável, ou seja, um dia irá se esgotar.

Figura 9 - Produção primária de energia no Brasil.



FONTE: IBP, 2022.

Porém, na realidade, o petróleo já está com seus dias contados. Conforme estimado pela British Petroleum, o prazo médio para que as reservas de petróleo ao redor do mundo se esgotem é de 40 anos. E, como, atualmente, os combustíveis marítimos são extremamente dependentes do petróleo, é uma preocupação mundial a busca por outras possibilidades, além de, claro, diminuir o consumo de combustíveis poluentes.

Por esses motivos, há um crescente interesse em desenvolver e utilizar fontes de energia renovável como alternativas mais sustentáveis aos combustíveis não renováveis.

A legislação atual e futura afetará os tipos de combustível disponíveis no mercado e influenciará os tipos de sistemas de propulsão desenvolvidos para acomodar esses combustíveis.

2.2 IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA NOS COMBUSTÍVEIS EM ESTUDO

Como já referido, a maioria dos navios mercantes de grande porte utilizam motores cujo combustível é o bunker, o qual contém concentrações elevadas de substâncias poluentes. Em comparação, os combustíveis utilizados nos navios possuem um teor de enxofre cerca de 2.700 vezes maior do que o diesel comum usado em automóveis. É importante ressaltar que, embora a quantidade total de poluição atmosférica causada pelos automóveis no mundo seja

consideravelmente maior do que a gerada pelo transporte marítimo, os navios representam a maior fonte de poluição atmosférica por tonelada de combustível consumido.

A análise dos principais impactos das atividades de transporte marítimo na qualidade do ar destaca que o setor é responsável por uma parcela significativa das emissões totais de poluentes atmosféricos, incluindo o CO₂. De fato, estima-se que as emissões de dióxido de carbono provenientes dos navios correspondam a aproximadamente 3,3% do total das emissões globais de CO₂. (Buhaug, Øyvind, et al, Second imo ghg study 2009, 2009)

Ainda nessa temática, de acordo com um estudo, estima-se que o consumo de combustíveis por navios aumente em 43,5% até 2050 no cenário mais favorável considerado (EYRING, 2005). Só em 2018, houve um crescimento de 9,3% nas emissões de CO₂, atingindo 1.056 milhão de toneladas (ASARIOTIS et al., 2018), confirmando, então, esse aumento no consumo de combustíveis, já que isso impacta diretamente na emissão de gases do efeito estufa.

Porém, para entender melhor a poluição do ar gerada por embarcações, é necessário, primeiramente, distinguir os gases que provocam efetivamente a poluição do ar e os gases relacionados com o efeito estufa, exemplo do CO₂. Uma vez que, por mais que muitas vezes as fontes emissoras sejam as mesmas, gases do efeito estufa (GEE) são diferentes de poluentes atmosféricos.

2.2.1 Poluentes Atmosféricos x Gases do Efeito Estufa (GEE)

Primeiramente, é preciso entender o que são poluentes atmosféricos e o que são gases de efeito estufa. Em relação aos poluentes, são considerados qualquer substância presente no ar que, devido a sua concentração, possa vir a se tornar impróprio, nocivo ou ofensivas à saúde, danosos às matérias, fauna, flora ou, ainda, prejudicial à segurança e atividades normais da comunidade. (Lisboa e Kawano 2007)

O nível de poluição atmosférica é avaliado a partir da quantidade de substâncias poluentes presentes do ar, mas, a variedade dessas substâncias é muito grande, o que torna complicada a classificação. Sendo assim, Loureiro (2005) classificou os poluentes atmosféricos em dois grandes grupos: poluentes primários e secundários.

Os primários são emitidos direto por fontes emissoras e estes poluentes, podem, na baixa atmosfera, sofrer transformações e reações fotoquímicas dando origem, então, aos poluentes denominados secundários, como o ozônio.

Quanto a sua principal fonte de origem, pode-se dizer que os poluentes do ar vêm, principalmente, da combustão incompleta de combustíveis fósseis, usados para fins de transporte, aquecimento e produção industrial.

Os gases e partículas poluentes são, então, aqueles que, quando respirados, causam mal para a saúde da população, além de outros problemas ambientais. Existem, hoje, sete poluentes atmosféricos regulados no Brasil: partículas totais em suspensão (PTS), partículas inaláveis (MP10), fumaça, dióxido de enxofre (SO₂), dióxido de nitrogênio (NO₂), monóxido de carbono (CO) e ozônio (O₃) (CETESB).

Cada um desses poluentes provoca um efeito diferente no ambiente, podendo resultar em impactos local, regional ou global. Os locais são aqueles que podem ser conferidos nas áreas próximas às fontes de poluição e são, principalmente, aqueles que podem trazer problemas para a saúde humano. Na Tabela 1 abaixo, estão listados alguns poluentes e os respectivos danos que eles causam.

Tabela 1 - Efeitos nocivos dos principais poluentes atmosféricos a saúde.

POLUENTES	EFEITOS NA SAÚDE
CO	Atua no sangue reduzindo sua oxigenação, náuseas e intoxicação
NO _x	Problemas respiratórios
MP	Pode penetrar nas defesas dos organismos, atingir os alvéolos pulmonares e causar irritações asma, bronquite e câncer nos pulmões
Sox	Irritação nos olhos, problemas respiratórios e cardiovasculares
O ₃	Irritação nos olhos e problemas respiratórios (reação inflamatória nas vias aéreas)

FONTE: Adaptado do IPEIA.

Já os impactos regionais, são os observados mais distantes da fonte de poluição, sendo um dos principais a chuva ácida (Mota, 2000). Principalmente porque, devido às correntes aéreas e regimes pluviais, as nuvens ácidas, que são formadas pelos gases NO_x e SO₂, podem viajar para muito distante do seu ponto de origem.

Por sua vez, o impacto global já diz respeito a aqueles problemas que podem afetar todo o planeta. Conforme Lora & Teixeira (2001), o maior problema causado pelo uso dos combustíveis fósseis é, justamente, o efeito estufa.

Logo, pode-se ver que existe uma relação entre os poluentes atmosféricos e o efeito estufa, ainda que não sejam diretamente iguais. Por isso que também é importante compreender mais sobre o efeito estufa.

O efeito estufa pode ser definido como o aumento constante da temperatura média da terra em detrimento do aumento da concentração atmosférica de certos gases, que retem parte do calor irradiado pela terra (Moreira, 2007). Esse efeito, inclusive, é responsável pela possibilidade de vida na terra, uma vez que, sem esse fenômeno natural, o planeta poderia se tornar muito frio, fazendo com que a sobrevivência das espécies se torne inviável.

O problema, na verdade, é o aumento significativo e descontrolado dos chamados GEE, gases do efeito estufa, que ocasionam o aquecimento global. Os gases do efeito estufa são o gás carbônico (CO₂), os clorofluorcarbonos (CFCs), o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O), entre outros. Eles capturam parte da radiação infravermelha que a terra devolve para o espaço, o que provoca o aumento da temperatura atmosférica.

Dentre esses gases, o de maior contribuição é o dióxido de carbono (CO₂), que é o principal composto resultante da combustão completa de combustíveis. Ele representa a maior parte das emissões de GEE e o seu tempo de permanência é de, no mínimo, 100 anos, o que gera impactos no clima ao longo de séculos (WWF, 2021).

Já o metano (CH₄), é emitido numa quantidade menor para a atmosfera, porém, possui um potencial de aquecimento 28 vezes maior que o do CO₂. O mesmo acontece para o óxido nitroso (N₂O), entretanto, seu potencial de aquecimento é maior ainda, é 265 vezes maior que o do CO₂ (WWF, 2021).

Os GEE são, portanto, os causadores do aquecimento global, que é, justamente, o aumento da temperatura média dos oceanos e da camada de ar mais próxima à superfície da Terra e que traz consigo algumas consequências graves, que já podem ser sentidas em diferentes partes do planeta.

Um das principais consequências do aquecimento global é o derretimento das calotas polares, conforme retratado na Figura 10, que pode causar o desaparecimento de ilhas e cidades litorâneas densamente povoadas, além de contribuir para a extinção de várias espécies,

sobretudo no Ártico, o que gera problemas ambientais de ordem ecológica (WWF, 2021). E ainda, esse derretimento vem causando a elevação do nível dos oceanos.

Figura 10 - Derretimento das calotas polares.



Fonte: Brasil Escola, UOL.

Outra consequência também muito relevante é o aumento das temperaturas, conforme já mencionado. Várias espécies podem vir a entrar em extinção, a água vai ter uma disponibilidade menor em muitas partes do planeta, já que os períodos de seca podem vir a se tornar maiores. São situações que prejudicam a oferta de recursos naturais para os seres vivos e a manutenção da cadeia alimentar.

Ademais, com o aquecimento global, fenômenos cíclicos e anomalias climáticas vêm tornando-se cada vez mais frequentes, como por exemplo o El Niño, que, entre outras consequências, proporciona secas severas em muitas regiões do globo (Brasil Escola).

De acordo com o levantando, existem, portanto, diferenças entre os gases do efeito estufa e o poluentes atmosféricos, ainda que alguns desses poluentes possam ser considerados gases de efeito estufa indiretos, como o CO, o NO₂ e o O₃.

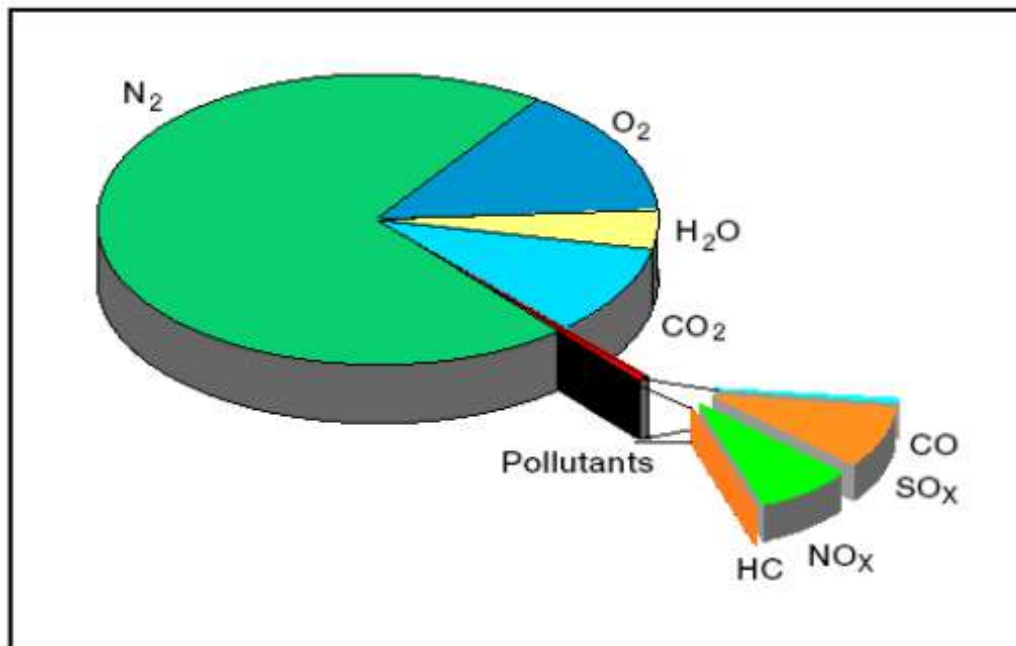
2.2.2 Os combustíveis marítimos e seus poluentes

No caso dos combustíveis marítimos, as emissões de poluentes consistem principalmente em óxidos de nitrogênio, como o óxido nítrico (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO₂), que são subprodutos dos processos de combustão. Quando em altas concentrações, esses ácidos podem causar problemas respiratórios e ainda, no ambiente, levam a formação de smog fotoquímico e chuva ácida.

Além disso, temos o dióxido de enxofre (SO₂), também conhecido como anidrido sulfuroso, que é um gás denso, incolor e não inflamável, porém altamente tóxico. Esses gases são emitidos durante a queima de combustíveis em veículos e indústrias, juntamente com óxidos de carbono (CO e CO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x). A inalação desse gás pode causar alguns efeitos na saúde, como irritação intensa, agravamento dos sintomas da asma e problemas respiratórios, no geral. Podem, também, no ambiente, reagir com a água na atmosfera, formando chuva ácida.

A Figura 11 abaixo mostra mostra que a porcentagem desses gases poluentes, gerados durante a queima do combustível do tipo bunker, é bem menor do que os gases causadores do efeito estufa, conforme dados obtidos no ano de 2004.

Figura 11 - Gases resultantes da queima do bunker.

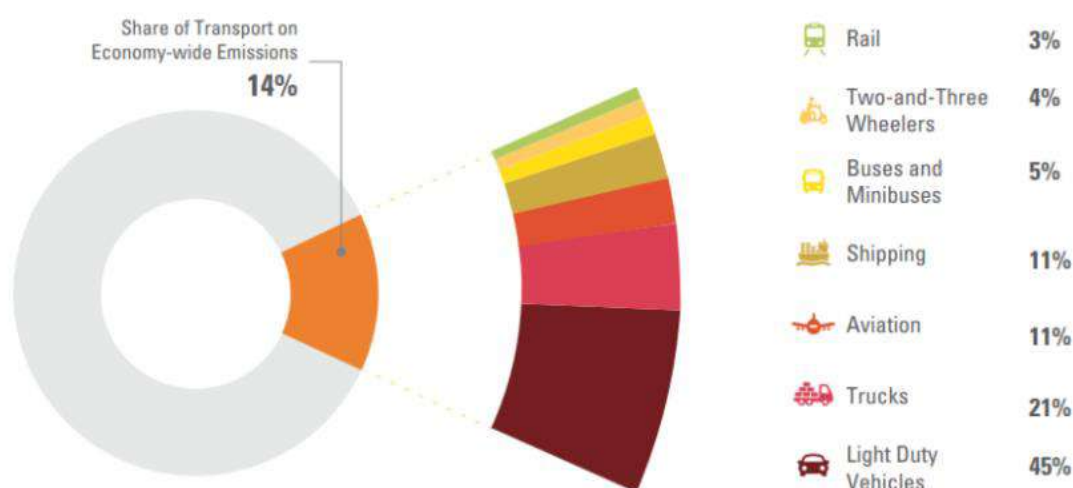


Fonte: A poluição do ar por navios.

Conforme pode-se observar na figura acima, os combustíveis marítimos impactam tanto na poluição do ar quanto no efeito estufa, porém, em proporções diferentes. A quantidade de gases do efeito estufa é, consideravelmente maior, quando comparada a outros.

Segundo dados do Diogo Lira Pontes (2014), o setor de transporte marítimo é responsável por uma pequena parcela das emissões totais de gases de efeito estufa em comparação com outros setores industriais. Em dezembro de 2018, o relatório “Situação Global do Transporte e Mudança Climática Global”, elaborado por 40 organizações internacionais, foi apresentado na 24ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP 24) e relatou que os transportes, no geral, são responsáveis por cerca de 14% das emissões dos gases do efeito estufa no mundo (Diário do Transporte). E, quando considerado os 14% como o valor de 100%, o transporte marítimo é responsável por 11% dessas emissões (2% na visão geral, com todos os transportes) (Figura 12).

Figura 12 - Gráfico do percentual de gases de efeito estufa em relação aos principais setores industriais.



Fonte: Diário do transporte, 2018.

À medida que o setor de transporte marítimo continua a crescer, esses números tendem a aumentar. O aumento da velocidade dos navios também contribui para o aumento das emissões de gases devido ao aumento do consumo de bunker fuel.

Se considerarmos que cada navio opera cerca de 200 dias por ano e supusermos um consumo médio de 180 g/kWh, estima-se que a frota global consumiu cerca de 0,39 bilhões de toneladas em 2007 (sem incluir os motores auxiliares). Levando em consideração que a queima de 1 tonelada de combustível produz aproximadamente 3 toneladas de CO₂, concluímos que todos os navios emitiram cerca de 1,16 bilhões de toneladas de CO₂ em 2007.

Apesar do cenário desanimador, consideráveis melhorias ambientais podem ser obtidos pela mudança das práticas de transporte, incluindo a mudança dos tipos de combustíveis marítimos utilizados, que impactaria enormemente na redução da emissão de gases poluentes.

2.3 AS PRINCIPAIS REGULAMENTAÇÕES DO TRANSPORTE MARÍTIMO

Devido às preocupações ambientais relacionadas às emissões de poluentes, algumas regulamentações e restrições têm sido implementadas para controlar a emissão de poluentes, o teor de enxofre e outras substâncias nocivas advindas dos combustíveis marítimos.

Regulamentações são um conjunto das medidas legais ou regulamentares que regem um assunto, uma instituição ou um instituto. São essenciais para o bom funcionamento de instituições ou institutos e, quando relacionadas a um assunto, são importantes para controlar aquelas questões que estão sendo levantadas pelo regulamento.

Em relação ao setor marítimo, suas operações são de escala global, pois as rotas comerciais marítimas são, em sua grande maioria, compartilhadas entre países. Por isso, a indústria marítima foi uma das primeiras a implementar padrões internacionais de segurança e, além do mais, é uma indústria muito regulamentada.

Sendo assim, a regulamentação marítima foi desenvolvida em nível global e o meio oficial de regulamentação desse transporte é a Organização Marítima Internacional, a IMO. Existem algumas outras instituições que já estipularam algum tipo de regulamentação, como a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) e até a União Europeia (UE), porém, a mais importante, e seguida mundialmente, é a IMO.

2.3.1 ORGANIZAÇÃO MARÍTIMA INTERNACIONAL, IMO

A Organização Marítima Internacional, IMO, é uma agência especializada das Nações Unidas (ONU) responsável por regulamentar e coordenar o transporte marítimo internacional. O objetivo da IMO é promover a segurança e a eficiência da navegação, além da proteção ambiental nos oceanos (IMO).

A IMO desenvolve e atualiza padrões internacionais para a construção, operação e manutenção de navios, além de regulamentar questões relacionadas à segurança da vida humana no mar e à prevenção da poluição marítima causada por navios.

Atualmente a IMO tem 175 Estados membros (Figura 13) e três associados membros (Ilhas Faroé, Hong Kong e Macau), além da participação de organizações intergovernamentais e não governamentais. Com isso, a IMO desempenha um papel importante na facilitação do comércio marítimo global e na cooperação internacional entre os Estados.

Figura 13 - Fachada da Organização Marítima Internacional com as bandeiras de todos os Estados membros.



FONTE: IMO.

A partir do século XIX, diversos tratados internacionais foram estabelecidos com o objetivo de fortalecer a segurança nos oceanos. Vários países se juntaram e apresentaram uma proposta de estabelecer uma organização internacional permanente que promovesse de maneira eficaz a segurança marítima. Porém, essa ação só foi concluída com a criação das Nações Unidas.

Foi quando, em 1948, durante uma conferência internacional em Genebra, adotou-se uma convenção que formalmente estabeleceu a Organização Marítima Internacional, IMO. Inicialmente chamada de Organização Consultiva Marítima Intergovernamental, ou IMC, seu nome só se alterou para IMO em 1982. A Convenção da IMO entrou em vigor em 1958 e a nova organização reuniu-se pela primeira vez no ano seguinte (IMO).

Originalmente, os propósitos da organização eram mais voltados para a segurança, e essa continua sendo a responsabilidade mais importante da IMO, todavia, um novo problema começou a surgir: a poluição. O aumento no volume de petróleo transportado por via marítima

e o aumento no tamanho dos petroleiros foram motivo de grande preocupação. Esse temor foi intensificado pelo desastre ocorrido com o navio Torrey Canyon em 1967, quando ocorreu o derramamento de 120.000 toneladas de petróleo, evidenciando a magnitude do problema (IMO).

Consequentemente, nos anos seguintes, a IMO adotou uma série de medidas na intenção de evitar acidentes com navios-tanque e minimizar as suas consequências, adicionalmente, também considerou a ameaça ambiental causada pelas operações de rotina, principalmente o descarte de resíduos.

Dentre todas essas medidas, a mais importante delas foi a Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios, MARPOL, adotada em 1973, que posteriormente foi emendada pelo Protocolo de 1978, se tornando conhecida como MARPOL 73/78.

A Convenção MARPOL de 1973 tem como objetivo principal minimizar a descarga acidental de poluentes no mar e eliminar por completo a poluição intencional causada por óleo e outras substâncias prejudiciais. Essa convenção estabelece sanções para violações de suas normas, regula a emissão de certificados pelas autoridades nacionais, entre outros assuntos (IMO).

Já o Protocolo de 1978, estabelece requisitos para inspeções, vistorias e certificados, especialmente para navios com mais de dez anos de idade. Além disso, esse protocolo adicionou o Anexo VI, intitulado “Regras para a Prevenção da Poluição do Ar por Navios”, que entrou em vigor em 19 de maio de 2005 (IMO).

Para atingir seus objetivos, a Convenção estabelece medidas específicas por meio de seis anexos técnicos, representados na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 - Anexos técnicos da MARPOL 73/78.

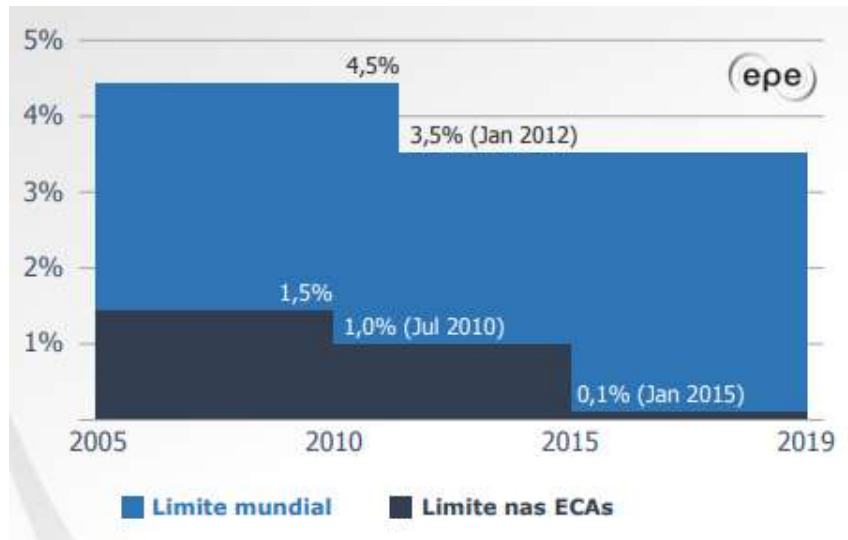
ANEXO	DESIGNAÇÃO	ENTRADA EM VIGOR
ANEXO I	Regulamento para a prevenção de poluição por hidrocarbonetos.	02/10/1983
ANEXO II	Regulamento para o controlo da poluição por carga com substâncias líquidas nocivas.	02/10/1983
ANEXO III	Prevenção da poluição por substâncias perigosas transportadas por mar e embaladas	01/07/1992
ANEXO IV	Prevenção da poluição por esgotos dos navios.	27/09/2003
ANEXO V	Prevenção da poluição por lixos gerados nos navios.	31/12/1988
ANEXO VI	Prevenção da poluição atmosférica dos navios.	19/05/2005

FONTE: Kunsch, 2021.

Dentre esses documentos, no Anexo VI, foram estabelecidas diretrizes objetivas para limitar a quantidade de poluentes atmosféricos liberados por navios, incluindo óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x), compostos orgânicos voláteis e material particulado (PM). Além disso, o Anexo VI estabelece os requisitos de qualidade do óleo combustível, como o teor de enxofre, a proibição de emitir deliberadamente substâncias destruidoras da camada de ozônio e a criação de áreas de controle de emissão (ECAs) (KUNSCH, 2021).

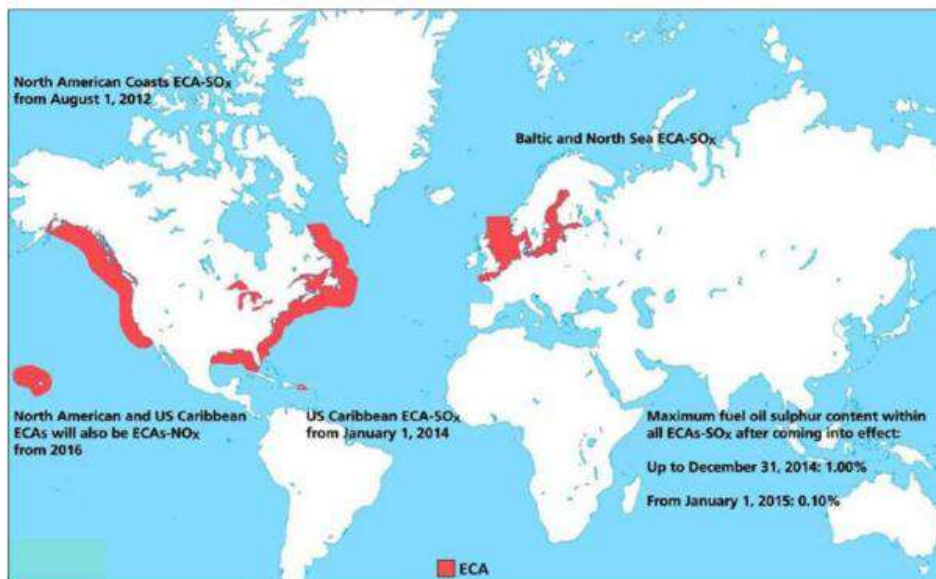
As ECAs são regiões marítimas em que foram estabelecidos controles mais rigorosos de emissões de SO_x. As atuais ECAs em vigor incluem o Mar Báltico, o Mar do Norte, águas da América do Norte, Estados Unidos e Caribe. Na Figura 14 abaixo, é possível ver que o limite de teor de enxofre nas ECAs é bem menor do que no resto do mundo. E na Figura 15 em seguida, tem-se um mapa das ECAs atualmente em vigor.

Figura 14 - Limite máximo do teor de enxofre nos combustíveis marítimos.



FONTE: EPE, 2019.

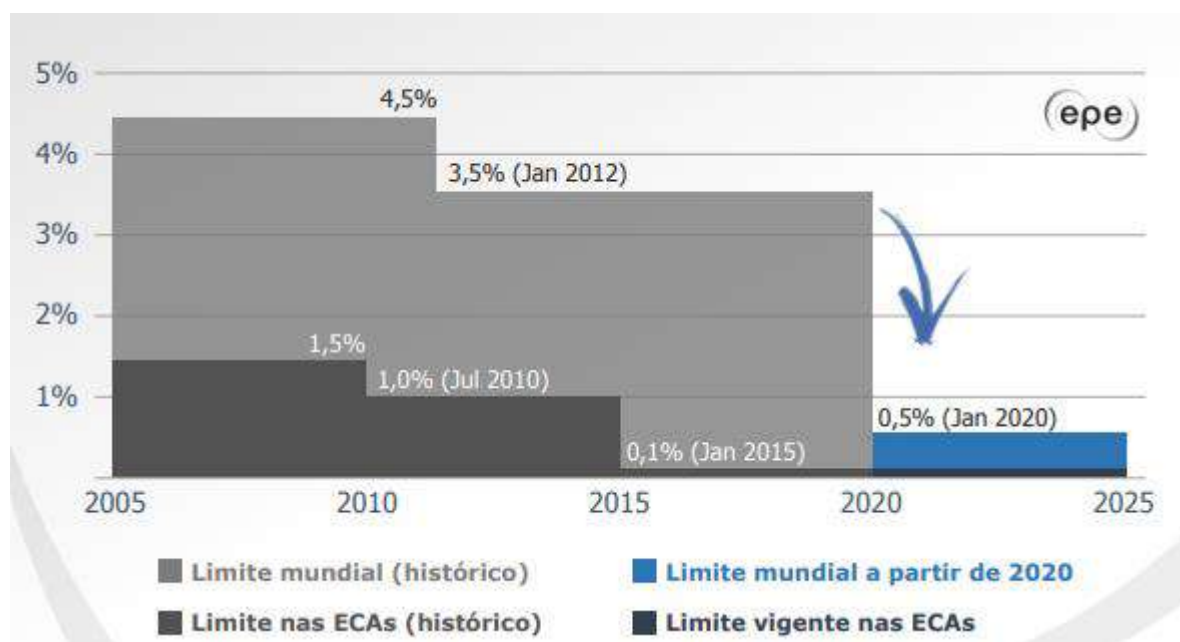
Figura 15 - Atuais ECAs em vigor.



FONTE: EPE, 2019.

Em outubro de 2016, os países membros do Anexo VI da MARPOL decidiram pela redução do teor de enxofre do bunker marítimo para 0,5% a partir do dia 1º de janeiro de 2020, frente aos 3,5% m/m anteriormente praticados, reduzindo a participação das emissões dos navios na poluição do ar de 5% para 1,5% (Figura 16).

Figura 16 - Limite máximo do teor de enxofre nos combustíveis marítimos até 2025.



FONTE: EPE, 2019.

Esse limite é válido para todos os navios, exceto em área de controle (ECAS), onde já era menor, e, além disso, esses limites têm como intenção reduzir a emissão de enxofre em 77%, equivalente a uma redução anual de aproximadamente 8,5 milhões de toneladas de dióxido de enxofra (HSIEH e FELBY, 2017).

Os mais de 170 países signatários da IMO, como pode ser visto na Figura 17 abaixo, irão adotar os novos limites de enxofre, o que inclui os principais portos do mundo e, serão os próprios países membros que terão que se responsabilizar pelo monitoramento da nova regulamentação em suas águas e pelo estabelecimento das sanções e penalidades, caso seja descumprida a regra.

Figura 17 – Mapa dos países que fazem parte da IMO.



FONTE: EPE, 2019.

A regulamentação do IMO 2020 se encaixa dentro do programa da Agenda 2030 (ONU), cujo principal objetivo é o desenvolvimento sustentável, e, além do mais, essa regulamentação tem também um impacto significativo na indústria marítima, exigindo ajustes na produção e distribuição de combustíveis marítimos de baixo teor de enxofre, bem como investimentos em tecnologias de redução de emissões.

Mais tarde, outros estudos adicionaram restrições também ao dióxido de carbono (CO₂), pois foi reconhecido como um dos principais contribuintes para o efeito estufa. Como resultado desses estudos, atualmente existe um plano para reduzir em 30% o consumo de energia nos navios até 2025. Essas regras se aplicam aos navios construídos após 2013, com uma arqueação bruta igual ou superior a 400 GT (gross tonnage).

2.3.2 Outras instituições e protocolos

Por mais que seja de total responsabilidade da IMO a regulamentação e, por isso, existe uma corrida para alcançar essas metas até então estabelecidas por ela, seja através de novos combustíveis ou novas fontes de energia ou pela utilização de mecanismos.

Porém, a nova regulamentação da IMO não foi a pioneira na estipulação de limites para o teor de enxofre em combustíveis e emissões de navios, houve outras instituições que também estipularam limites.

2.3.2.1 United States Environmental Protection Agency (USEPA)

No estado da Califórnia, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, na sigla em inglês) implementou uma exigência durante os anos de 2008 e 2009, que determinava o uso de combustíveis marítimos destilados mais limpos em navios oceânicos que operavam nas áreas costeiras da Califórnia. Essa exigência foi estabelecida com foco especial no controle dos níveis de enxofre nos combustíveis (VAN et al., 2019).

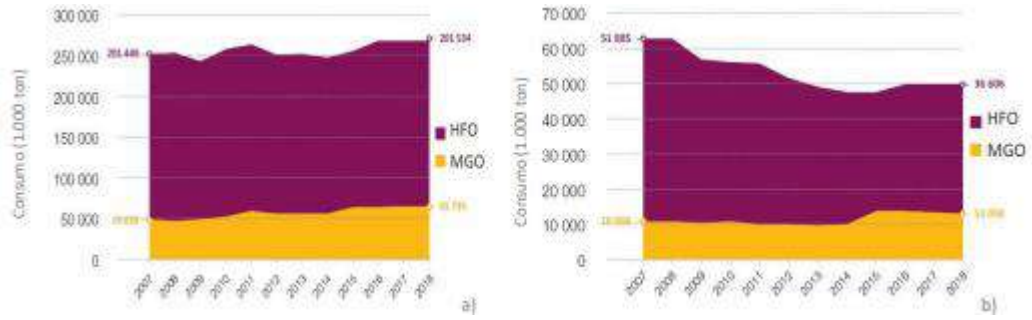
Além disso, a USEPA, impõe que alguns tipos de navios cumpram os regulamentos de atracação com a meta de redução de emissões de 80% até 2020 (VAN et al., 2019).

2.3.2.2 União Europeia

Em 2010, a União Europeia (UE) estabeleceu um requisito que determinava o uso de óleo combustível com um teor de enxofre inferior a 0,1% em massa para todos os navios atracados ou fundeados em portos europeus (PARLAMENTO EUROPEU, 2005). Além disso, a UE permitiu que navios de passageiros em áreas onde não havia controle de emissões utilizassem combustíveis marítimos com teor de enxofre de 1,5% até 1º de janeiro de 2020 (VAN et al., 2019).

Na Figura 18 apresenta-se o consumo de combustível marítimo mundial e na UE, respectivamente. Até o ano de 2018, é observado que a demanda global por combustível marítimo era predominantemente atendida pelo uso de combustível pesado (HFO, sigla em inglês para Heavy Fuel Oil), representando 75,5% do mercado, enquanto o gásóleo marinho (MGO, sigla em inglês para Marine Gas Oil), um combustível com menor teor de enxofre em comparação ao HFO, representava apenas 24,5%. No entanto, na União Europeia, nos últimos anos, foi registrado um aumento no consumo de MGO devido às regulamentações impostas nessa região.

Figura 18 - Consumo de combustível marítimo: a) mundial; b) europeu.



FONTE: Emissões gasosas de navios de cruzeiro: impactes das águas de lavagem dos scrubbers no meio marinho, 2020.

3 METODOLOGIA

A metodologia é a explicação detalhada de toda ação a ser desenvolvida durante o trabalho de pesquisa (FONSECA, 2002). Segundo Gerhardt e Silveira (2009), metodologia significa o estudo da organização, dos caminhos a serem percorridos e dos recursos utilizados na realização de uma pesquisa.

Assim, neste capítulo, serão discutidos os procedimentos metodológicos empregados na pesquisa com o intuito de alcançar os objetivos geral e específicos estabelecidos. Para isso, foram definidas a estratégia de pesquisa, a formulação do instrumento de coleta de dados e a realização da coleta dos dados.

Para o desenvolvimento deste trabalho, adotou-se a metodologia de pesquisa descritiva, que tem como propósito descrever situações, eventos, opiniões ou comportamentos de um determinado grupo populacional, a fim de obter informações sobre um determinado tema (Silva et al., 2012).

A escolha da metodologia descritiva foi motivada pelo fato de o tema proposto já ser amplamente difundido e conhecido, cabendo ao trabalho revisá-lo, resumi-lo e proporcionar um melhor entendimento do atual cenário dos combustíveis marítimos e das novas qualidades que surgem, visando a redução do impacto ambiental.

Nesse contexto, foi utilizada a pesquisa bibliográfica como tipo de abordagem metodológica. A pesquisa bibliográfica é desenvolvida a partir da literatura publicada, composta principalmente por livros e artigos científicos. Permite ao pesquisador utilizar recursos e materiais disponíveis sobre um determinado tema de estudo (Silva et al., 2012). As principais fontes utilizadas foram artigos científicos, monografias, sites de notícias, relatórios estatísticos, documentos legais (leis, regulamentos, decretos, portarias) e normas técnicas.

Quanto à abordagem, a pesquisa adotada foi classificada como qualitativa, com o objetivo de compreender os fenômenos por meio da coleta de dados narrativos, analisando as particularidades e experiências individuais. Conforme Neves (1996), a pesquisa qualitativa compreende um conjunto de diferentes técnicas interpretativas que visam descrever e decodificar os elementos de um sistema repleto de interpretações.

3.1 PROCEDIMENTOS TÉCNICOS

Inicialmente, nesse trabalho, realizou-se uma revisão bibliográfica sobre o tema em estudo por meio da literatura de artigos científicos, monografias, revistas nacionais e

internacionais. Essa análise inicial foi realizada na intenção de se escolher a metodologia a ser seguida durante a execução do estudo.

Em seguida, para cada capítulo desse trabalho foi aplicada uma metodologia diferente, segue uma descrição de cada uma dessas:

No segundo tópico do estudo, uma pesquisa bibliográfica foi feita, a fim de avaliar os combustíveis marítimos usados atualmente, o processo que o envolve, o quanto esses combustíveis influenciam na emissão de gases e, claro, fazer um levantamento dos combustíveis marítimos alternativos em pauta nos estudos recentes, avaliando também o seu processo e aplicação nos navios.

Para esses, foram obtidas informações sobre oferta, demanda, projeção futura de mercado e matéria-prima, todas obtidas de acordo com dados disponíveis em plataforma governamentais, EPE, além de artigos científicos e fontes de notícias.

Seguindo adiante, no quarto tópico, foram explicitados os resultados e discussões sobre os combustíveis marítimos alternativos avaliados. Todas as informações foram obtidas a partir de artigos científicos e dissertações, com foco nas plataformas de pesquisa, como a revista científica Elsevier e Google Acadêmico, foram buscados dados em dissertações e artigos sobre o processo produtivo, bem como nas plataformas governamentais e regulatórias, como EPE, obtendo informações sobre oferta, demanda e projeções nacionais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme salientado pela revisão bibliográfica, a queima de combustíveis fósseis gera consequências ambientais no planeta, e embora a quantidade total de poluição atmosférica causada pelos automóveis no mundo seja consideravelmente maior do que a gerada pelo transporte marítimo, os navios representam a maior fonte de poluição atmosférica por tonelada de combustível consumido.

Adicionalmente, a nível mundial, observa-se um destaque do transporte marítimo com um dos principais meios de transporte de carga atualmente, o que aumenta, proporcionalmente os índices de emissão de poluentes. Porém, as regulamentações da IMO vem na contramão desse aumento, propondo regras de novos limites de emissão, fazendo com que a indústria marítima tenha que se adequar a elas.

Para atender esses novos limites de emissão e ainda minimizar custos de novos processos, o setor de transportes marítimos tem buscado várias soluções, de curto a longo prazo. As principais opções incluem a utilização de sistemas de "scrubbers" para a redução de emissões ou até mesmo a adoção de combustíveis sintéticos e hidrogênio. Entre os esforços da indústria, destaca-se como uma alternativa promissora no cenário atual o uso de biocombustíveis, pois possuem um teor de enxofre quase nulo e atendem aos requisitos de redução das emissões de CO₂. Vale ressaltar que o consumo de combustível pelas embarcações é sempre significativo (HSIEH, C. C.; FELBY, C., 2017).

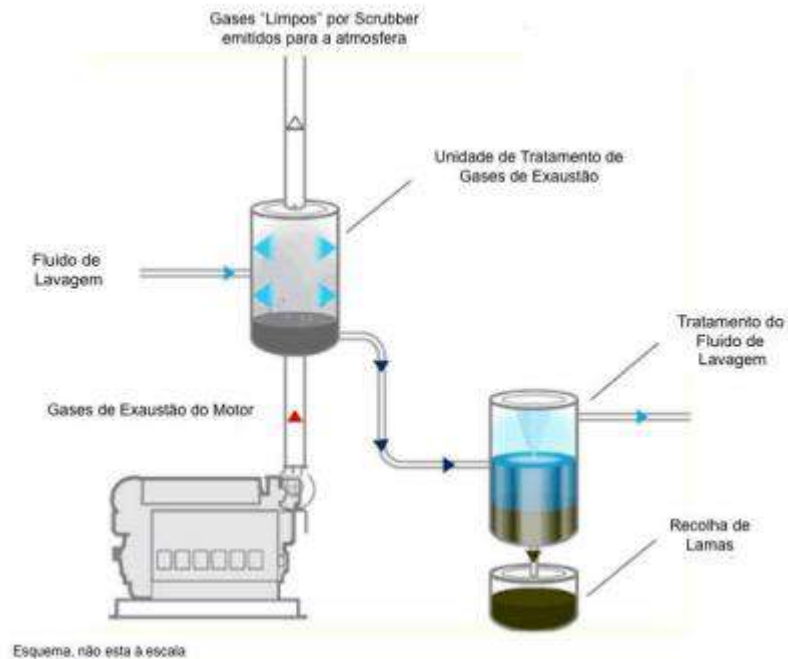
4.1 NOVAS PROPOSTAS PARA TRANSPORTES MARÍTIMOS

4.1.1 Scrubbers

Um "scrubber" é um dispositivo utilizado para purificar os gases de escape, removendo os poluentes presentes, antes de serem liberados na atmosfera. Esses sistemas são amplamente empregados em navios e em outras indústrias cujo objetivo seja diminuir as emissões de gases poluentes, como óxidos de enxofre (SO_x) e óxidos de nitrogênio (NO_x).

Os scrubbers podem ser instalados nas chaminés das embarcações para purificar e neutralizar os gases de escape, contribuindo para a redução do impacto ambiental decorrente dessas emissões. Conseqüentemente, a instalação desse dispositivo permite a utilização de óleo combustíveis com alto teor de enxofre (high-sulfur fuel oil – HSFO). Na Figura 19 abaixo, representam-se os componentes básicos de um scrubber.

Figura 19 - - Componentes básicos de um scrubber.



FONTE: Emissões gasosas de navios de cruzeiro: impactes das águas de lavagem dos scrubbers no meio marinho, 2020.

A unidade de tratamento de gases de exaustão desempenha um papel fundamental como uma câmara de contato entre o fluxo dos gases provenientes do motor e o fluido de lavagem, seu objetivo é remover os poluentes solúveis e insolúveis presentes no fluido de lavagem.

Após passar pela unidade de tratamento de gases de exaustão, o fluido de lavagem contém substâncias como SO_2 , SO_3 , NO_2 , que reagem formando sulfatos, nitratos e sólidos em suspensão, além de metais pesados, hidrocarbonetos e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos. Por fim, o depósito de lamas tem a função de coletar os resíduos separados da água de tratamento.

A composição dos gases efluentes do sistema de tratamento de gases de exaustão depende da qualidade do combustível utilizado, da eficiência da combustão, da qualidade da água utilizada para a lavagem e da própria eficiência do scrubber (Lange & Markus, 2015).

Portanto, por se tratar de uma solução que exige um espaço físico no navio, espera-se, que navios de grandes dimensões sejam os responsáveis pela maior parte dessas instalações.

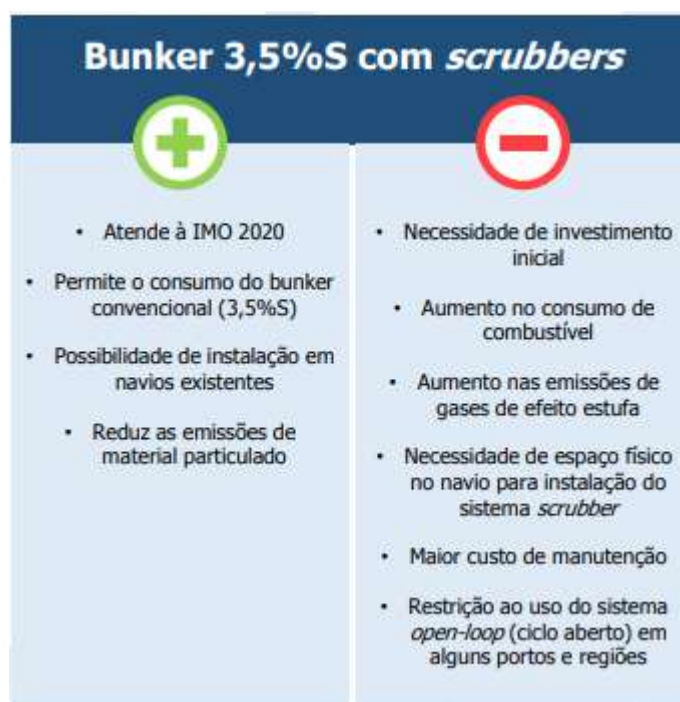
Essa alternativa é, entre os armadores de navios, uma boa opção, sendo a principal escolha de cerca de 20% das embarcações. Uma das suas vantagens é, de acordo com Má et al. (2012), que analisou o ciclo de vida de refinação dos diferentes combustíveis e respetivo

consumo energético, a opção pela utilização de scrubbers consome menos energia do que o processo de remoção do enxofre realizado nas refinarias.

Entretanto, observou-se que ,no ano de 2021, a solução foi adotada por aproximadamente 5% das embarcações (ÁLVAREZ, 2021). Isso porque, as desvantagens predominantes nesta solução consistem, nos elevados custos de investimento, cerca de U\$S 2 a 10 milhões, e na redução nos lucros, porque ocorre perda de área de armazenamento no navio, já que precisa instalar a estrutura necessária, além do fato de ser uma tecnologia recente e não comprovada, afetando sua confiabilidade (ZHU et al., 2020; LI et al., 2020; ÁLVAREZ, 2021).

Adicionalmente, o emprego do scrubber resulta em um aumento de aproximadamente 2% a 3% no consumo de combustível da embarcação, o que acarreta custos operacionais mais elevados e um aumento nas emissões de gases de efeito estufa. Na Figura 20 abaixo, estão as vantagens e desvantagens dessa instalação.

Figura 20 – Vantagens e desvantagens dos scrubbers.



FONTE: EPE, 2019.

A maioria significativa dos scrubbers instalados, aproximadamente 80%, são do tipo open-loop (ciclo aberto), nos quais o enxofre é removido dos gases de exaustão através de um processo que utiliza água do mar, sendo que a água contaminada é descartada diretamente no oceano. Esses scrubbers open-loop são mais acessíveis em termos de custo e exigem uma menor necessidade de manutenção em comparação aos sistemas closed-loop (que armazenam os resíduos a bordo dos navios e descarregam em tanques nos portos).

No entanto, alguns dos principais portos do mundo, como Singapura, Fujairah, Antuérpia e todos os portos chineses, implementaram proibições ao uso de scrubbers open-loop em suas águas. Isso implica que os scrubbers open-loop devem ser utilizados apenas em águas internacionais, enquanto os navios devem optar por consumir combustíveis com baixo teor de enxofre, como DMA ou bunker 0,5%, quando estiverem próximos a esses portos.

Figura 21 - Previsibilidade de navios equipados com scrubbers entre 2017 e 2024.



FONTE: EPE, 2019.

Estima-se que 20% da frota mundial, em termos de consumo de combustível marítimo, esteja equipada com scrubbers em 2024, conforme se observa na Figura 21 acima. No longo prazo, com a maior disponibilidade do bunker 0,5% nos portos, a tendência é que a instalação de scrubbers nos navios seja reduzida.

4.1.2 Mudança no consumo para combustíveis de baixo teor de enxofre – Diesel Marítimo (DMA/MGO) e Low Sulfur Fuel Oil (LSFO)

Como visto na revisão bibliográfica, o combustível do tipo bunker se constitui como o principal combustível utilizado, sendo empregado nas embarcações de grande porte. Porém, para atender as regulamentações da IMO, uma das propostas levantadas é realizar a transição para combustíveis de baixo teor de enxofre, , como o Marine Gas Oil (MGO) e o óleo combustível com baixo teor de enxofre, do inglês Low Sulfur Fuel Oil (LSFO).

O Diesel Marítimo, como já visto anteriormente, é produzido a partir de frações mais leves do processo de refino em comparação ao bunker e é considerado um óleo combustível de baixo teor de enxofre, porque possui teor de enxofre entre, aproximadamente, 0,10 e 1,5% m/m.

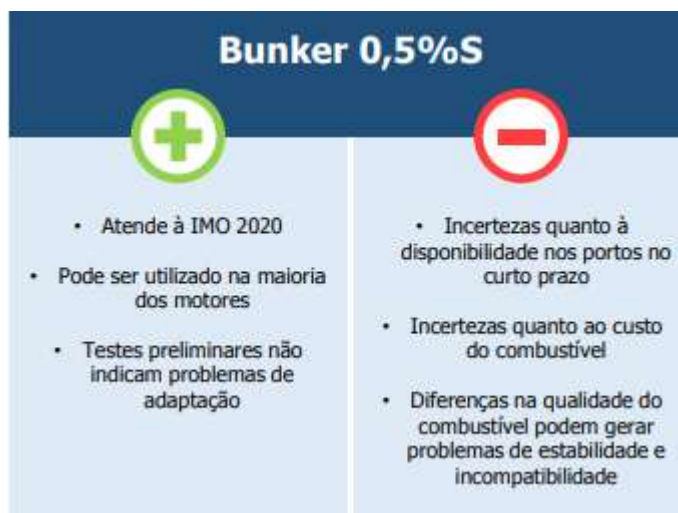
O LSFO, por sua vez, significa óleo combustível com teor de enxofre entre 0,5 e 1%, enquanto VLSFO significa óleo combustível com um teor de enxofre igual ou inferior a 0,5%. Já o óleo combustível com baixo teor de enxofre, cujo teor de enxofre é menor ou igual a 0,1%, é o ULSFO.

No caso de ambos os tipos de combustíveis, a escolha tem suas vantagens, uma vez que evita um grande investimento de capital em reformas de embarcações, exigindo apenas pequenas modificações nos tanques e motores (ZHU et al., 2020; LI et al., 2020). Para o diesel marítimo, é ainda mais vantajoso, porque já é um combustível estabelecido e com ampla disponibilidade, diferentemente do LSFO.

Todavia, essa alternativa também apresenta uma desvantagem significativa: o alto custo em comparação com o HFO, o que acarreta um aumento nos custos operacionais (ZHU et al., 2020; LI et al., 2020). Além disso, é importante ressaltar que a utilização do diesel marítimo em motores de navios de grande porte pode requerer modificações na viscosidade desse combustível.

Nas Figura 22 Figura 23 abaixo, estão listadas a vantagem e a desvantagem de cada uma dessas opções de combustível.

Figura 22 - Vantagens e desvantagens do LSFO (Bunker 0,5%).



FONTE: EPE, 2019.

Figura 23 - Vantagens e desvantagens do diesel marítimo (DMA/MGO).



FONTE: EPE, 2019.

Avaliando as vantagens e desvantagens, mesmo assim, estima-se que o LSFO será a principal alternativa em conformidade com as novas regulamentações da IMO. No entanto, no curto prazo, a oferta desse combustível pode ser limitada devido à disponibilidade reduzida de correntes de baixo teor de enxofre no processo de refino global.

No curto prazo, devido à falta de uma especificação internacional, e prevê-se que não seja estabelecida uma antes de 2024, espera-se que haja diferenças significativas na qualidade do LSFO entre os diversos fornecedores devido à falta de padronização. A variabilidade da qualidade do LSFO em todo o mundo pode gerar incompatibilidades, como formação de resíduos, potencialmente causando problemas operacionais e de manutenção nos motores das embarcações.

Tanto o consumo de LSFO quanto o de diesel marítimo não resultam em alterações significativas nas emissões de gases de efeito estufa e óxidos de nitrogênio (NOx) em comparação com o bunker convencional.

Alguns testes preliminares em viagens de longa distância utilizando LSFO já foram realizados e não têm mostraram problemas significativos. Inclusive, empresas como BP, Chevron, ExxonMobil, Petrobras, Repsol e Shell relataram que estão se preparando para fornecer LSFO, assim como os principais portos de abastecimento de navios do mundo, como Singapura, Fujairah e Rotterdam.

4.2 NOVAS QUALIDADES DE COMBUSTÍVEIS MARÍTIMOS: COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

As restrições ambientais relacionadas à emissão de poluentes provenientes da queima de combustíveis fósseis e a dependência desses combustíveis pelos navios estão impulsionando a busca por meios mais sustentáveis e eficientes de geração de energia. Conforme enfatizado na análise bibliográfica, a maioria dos combustíveis utilizados nos sistemas do transporte marítimo é derivada do petróleo, o que acarreta impactos ambientais e econômicos. (CBIE, 2019)

Com isso, observa-se um crescente movimento em direção ao uso de combustíveis alternativos., que são essenciais para reduzir a dependência de combustíveis poluentes, contribuindo para a preservação do meio ambiente e da saúde humana.

Combustíveis alternativos são advindos de fontes energéticas renováveis, ou seja, sua origem vem de uma matéria prima abundante na natureza, que é reposta em tempo útil e não é controlada diretamente por nenhum território. Eles também são frequentemente chamados de não convencionais, por serem uma alternativa aos combustíveis mais comuns, aqueles que emitem os poluentes.

No contexto do transporte marítimo, a substituição de óleo diesel (diesel marítimo) e óleo pesado (bunker) de origem fóssil por combustíveis renováveis, como etanol, metanol, amônia, biogás, biodiesel e hidrogênio, é importante devido aos altos níveis de emissões de enxofre provenientes dos transportes marítimos, e as novas regulamentações de emissões de poluentes, publicadas pela IMO.

Dessa forma, o uso de fontes alternativas de combustíveis é uma opção para se adequar às novas regulamentações ambientais. Porém, é importante entender que, não basta que os operadores decidam utilizar um combustível com menor teor de enxofre, outros aspectos que podem influenciar a operação dos motores também devem ser considerados.

4.2.1 GNL

O GNL, gás natural liquefeito, vem do gás natural, que é a terceira fonte energética mais importante do mundo. O gás natural, por sua vez, é um combustível de origem fóssil, composto principalmente por hidrocarbonetos (carbono e hidrogênio) e é encontrado no estado físico gasoso. O processamento do gás natural é quem dá origem ao gás natural liquefeito, também chamado de GNL.

A obtenção do GNL se dá a partir de um processo criogênico, onde o gás natural é filtrado e resfriado a uma temperatura de -163 °C, o que faz com que seu volume seja reduzido em aproximadamente 600 vezes, porque, durante esse processo, ocorre a condensação, ou seja, a passagem do estado gasoso para o líquido.

O GNL é composto principalmente por metano e, em menores proporções, por etano, propano, entre outros componentes encontrados no gás natural e é um combustível incolor e inflamável.

Esse gás se apresenta como poderoso aliado e alternativa de combustível para o transporte marítimo, principalmente devido a abundância de recursos para sua produção e a menor emissão de enxofre, é de inferior a 0,01% em massa, e NOx, se comparado aos combustíveis tradicionais.

Em relação a suas vantagens, o gás natural liquefeito possui uma proporção mais alta de hidrogênio/carbono que óleos diesel, portanto, é esperado que o uso de GNL reduza as emissões de CO2 em cerca de 25%. Além disso, um dos argumentos principais para se utilizar o GNL como combustível marítimo é a remoção completa das emissões de SOx e de PM (material particulado), além de redução nas emissões de NOx, entre 20 e 80% e de GEE, entre 10 e 20%.

Na Tabela 3 abaixo, pode-se verificar que o GNL tem potencial de emissão de gases poluentes significativamente menor comparado ao óleo combustível e ao carvão.

Tabela 3 - Comparativo de emissões entre gás natural, óleo e carvão.

Pollutant	Natural gas	Oil	Coal
Carbon dioxide	117,000	164,000	208,000
Carbon monoxide	40	33	208
Nitrogen oxides	92	448	457
Sulphur dioxide	1	1,122	2,591
Particulates	7	84	2,744
Formaldehyde	0.750	0.220	0.221
Mercury	0.000	0.0007	0.016

FONTE: FGV Energia, 2020.

Já sobre as desvantagens, o abastecimento de GNL não é algo que está totalmente pronto e regulamentado e existe, ainda, uma falta de infraestrutura para distribuição e armazenamento.

Adicionalmente, existe um risco de vazamento de metano, que influencia negativamente o efeito estufa.

Experiências das balsas norueguesas de GNL sugerem que são necessárias cerca de três a quatro vezes mais espaço para armazenamento de combustível a bordo do que para o HFO (BENGTSSON, ANDERSSON, et al., 2011). Ou seja, o uso do gás natural liquefeito exige um reequipamento, que, segundo ZHU et al. E LI et al. (2020), é altamente custosa. Na Figura 24 abaixo, estão listadas as vantagens e desvantagens do GNL.

Figura 24 - Vantagens e desvantagens do GNL.



FONTE: EPE, 2019.

No contexto do uso do GNL como combustível para embarcações, ele é classificado como uma fonte de transição, sendo, então, uma opção de curto e médio prazo, uma vez que não cumprirá as restrições estabelecidas pela IMO para 2050, que visam a redução do uso de combustíveis fósseis. Entretanto, até esse período, o GNL desempenhará um papel fundamental na transição energética, não apenas no transporte marítimo e terrestre, mas também na geração de eletricidade e na indústria em geral.

A relevância do GNL nos próximos anos vai além do setor de transporte marítimo, englobando também outros modos de transporte terrestre, como o rodoviário e ferroviário, tanto a nível nacional quanto global. Devido ao seu papel como uma fonte de energia estratégica para as próximas décadas, é crucial abordar essa questão em uma perspectiva macro.

Em relação aos desafios tecnológicos, o uso do GNL como combustível marítimo já é uma realidade global, com 204 navios atualmente operando com essa opção, e se resume a embarcações que realizam trajetos fixos entre portos fornecedores deste combustível (principalmente cruzeiros e navios de contêineres).

Além disso, há a expectativa de entrega de mais 294 navios que utilizarão GNL como combustível (SEA LNG, 2021). Recentemente, o maior navio cargueiro movido a GNL do mundo partiu de Cingapura, transportando 20.723 contêineres a bordo (Figura 25) (PORTOS E NAVIOS, 2020).

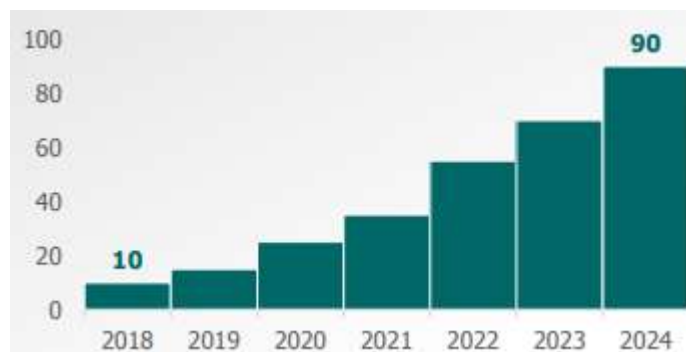
Figura 25 - CMA CGM Jacques Saade, maior navio cargueiro do mundo movido a GNL.



FONTE: A regulamentação IMO 2020 e seus impactos no setor portuário mundial e nacional.

Até 2024, é esperado que o consumo de GNL represente cerca de 2% da demanda mundial de combustíveis marítimos, conforme explicitado na Figura 26 abaixo.

Figura 26 - Demanda de GNL como combustível marítimo, 2018-2024 (mil barris/dia).



FONTE: EPE, 2019.

4.2.2 Etanol

Entre as opções de combustível alternativo está o etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$), que se destaca como uma alternativa eficiente, limpa, já que emite menos gases poluentes, e mais barata. Trata-se de um biocombustível de origem vegetal e é empregado como fonte renovável de energia, possuindo um odor característico, além de ser inflamável, incolor e solúvel em água.

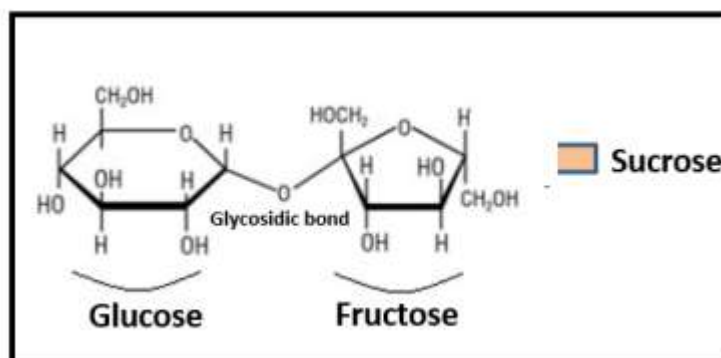
O etanol é amplamente empregado como biocombustível na indústria de transporte em escala global, sendo os Estados Unidos o principal produtor, seguido pelo Brasil, onde ele é produzido por meio da cana-de-açúcar e apresenta a tecnologia mais avançada na fabricação do produto.

É um combustível obtido a partir de fermentação alcoólica e pode ser obtido de diversos vegetais, desde que sejam ricos em açúcares, como a cana-de-açúcar, a mandioca, o milho, a beterraba e o eucalipto, isso para o combustível de primeira geração. No que diz respeito ao etanol de segunda geração, é comum utilizar matérias-primas lignocelulósicas, como biomassa lenhosa, resíduos agrícolas (como o bagaço de milho e a palha de trigo) e gramíneas.

O principal método de obtenção do etanol é por meio da fermentação, onde, de forma resumida, é adicionado, num meio açucarado, a levedura *Saccharomyces cerevisiae* que quebra as moléculas de açúcar ($C_6H_{12}O_6$) e transformam em duas moléculas de etanol e mais duas de gás carbônico (CO_2).

A produção de etanol de primeira geração, como já citado, utiliza matérias-primas sacarídeas, à base de açúcar e que acumulam energia na forma de sacarose, como cana-de-açúcar, beterraba, entre outros.

Figura 27 - Estrutura da sacarose.



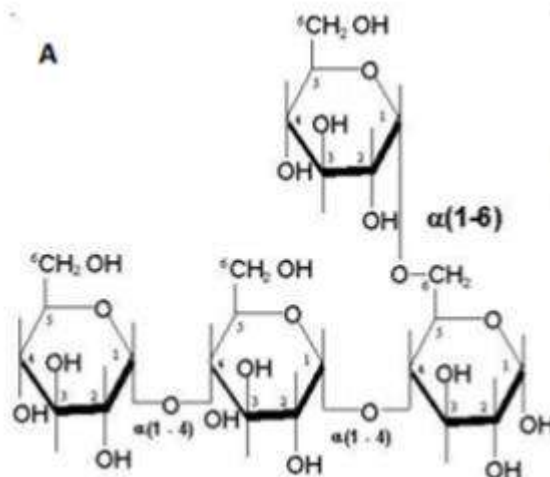
FONTE: Tecnologias e combustíveis para motores - transporte terrestre e marítimo.

A sacarose (Figura 27) é um dissacarídeo não redutor composto por glicose e frutose, que pode ser quebrado em açúcares redutores, glicose e frutose, através da ação da enzima invertase beta-D-fructosidase, seja de forma extracelular ou intracelular no citoplasma.

O etanol de primeira geração também pode ser produzido a partir de fontes de matéria-prima amiláceas, que armazenam energia na forma de amido, como o milho, batata, mandioca, entre outros. Além dos açúcares simples como sacarose, glicose, frutose e maltose, o amido é o principal carboidrato de reserva sintetizado pelas plantas superiores por meio do processo de

fotossíntese. O amido (Figura 28) é composto por uma mistura de dois polissacarídeos: amilose (15-25%) e amilopectina (75-85%).

Figura 28 – Estrutura do amido.



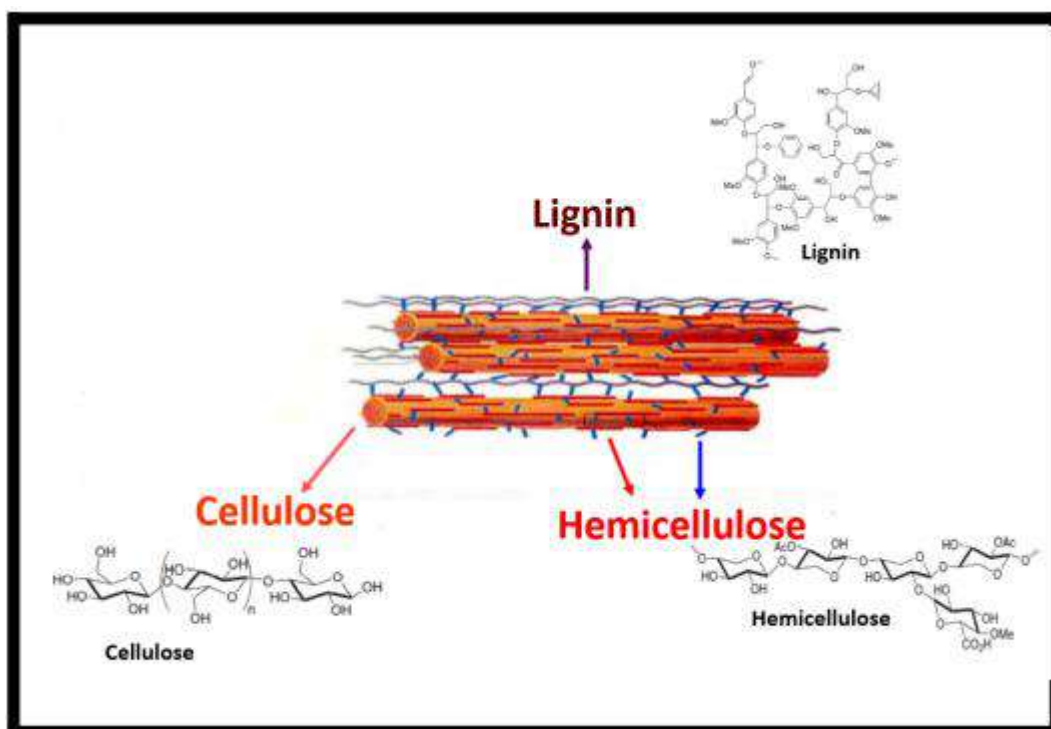
FONTE: Tecnologias e combustíveis para motores - transporte terrestre e marítimo.

As vantagens de usar matérias-primas de primeira geração para a produção de bioetanol são que a infraestrutura para plantio, colheita e processamento já está instalada. Ademais, os carboidratos obtidos dessas culturas são relativamente fáceis de extrair e hidrolisar em glicose antes da fermentação em etanol.

Todavia, culturas como cana-de-açúcar e milho também são alimentos básicos em muitas regiões do mundo, o que torna essa solução não tão viável para atender às necessidades mundiais de energia devido ao baixo rendimento por hectare. E é daí que surge o interesse em etanol de 2^o geração.

Para a produção de etanol de 2^a geração, as matérias-primas lignocelulósicas são as mais comuns, formadas por estruturas duras e fibrosas, compostas majoritariamente pelos polissacarídeos celulose e hemicelulose (cerca de 70% da massa seca), entremeados por outra macromolécula formada por álcoois aromáticos, a lignina, aos quais se encontram unidos por ligações covalentes e de hidrogênio (Figura 29) (LEE, 1997). Estes incluem biomassa lenhosa, resíduos agrícolas (fogão de milho, palha de trigo) e gramíneas.

Figura 29 - Esquema estrutural simplificado das fibras do material lignocelulósicas.



FONTE: Tecnologias e combustíveis para motores - transporte terrestre e marítimo.

A extração e processamento dos carboidratos para a fermentação em etanol utilizando essas matérias-primas são mais energeticamente intensivos e requerem mais etapas. Como os carboidratos presentes nas matérias-primas de segunda geração não estão prontamente acessíveis em seu estado natural, o material inicial precisa passar por um processo de pré-tratamento antes que seu conteúdo de celulose possa ser hidrolisado por enzimas celulolíticas. A glicose resultante da etapa de hidrólise é então fermentada em etanol, que passa por destilação a vácuo e é processada como combustível.

Os resíduos sólidos resultantes da destilação consistem principalmente de lignina, conhecida como lignina de hidrólise, que pode ser utilizada diretamente como combustível de aquecimento ou convertida em outros produtos de maior valor agregado. Todo o processo de produção é isento de enxofre ou possui baixíssimo teor de enxofre, dependendo do pré-tratamento inicial, garantindo que o coproduto de etanol e lignina esteja em conformidade com as diretrizes de enxofre estabelecidas pela IMO, caso sejam introduzidos na mistura de combustível naval.

O progresso das tecnologias de motores a diesel multicompostíveis representa uma possível oportunidade para a utilização de bioetanol como combustível marítimo. No entanto,

é importante ressaltar que levará um longo período, possivelmente décadas, até que essas tecnologias estejam amplamente disponíveis em um maior número de embarcações.

As principais vantagens do etanol estão diretamente ligadas a sua ampla disponibilidade e preços inferiores aos outros combustíveis, e ainda, de acordo com um estudo realizado pela OCDE em 2008, constatou-se que o etanol derivado da cana-de-açúcar é capaz de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em uma faixa de 70% a 90% durante todo o ciclo de produção, quando comparado às emissões provenientes de combustíveis fósseis.

Já os biocombustíveis produzidos a partir de trigo e açúcar de beterraba apresentam uma redução de aproximadamente 60% nas emissões de gases de efeito estufa, enquanto o etanol de milho resulta em uma redução de cerca de 30%.

Entretanto, o etanol apresenta algumas desvantagens. Para sua utilização em motores diesel, é necessário aumentar seu número de cetanos e seu poder de lubrificação, o que resulta em um aumento significativo no custo de produção (MCCORMICK; PARISH, 2001).

Além disso, o bioetanol possui aproximadamente metade da densidade energética do diesel, o que implica em maior necessidade de espaço de armazenamento do combustível. Em termos de segurança operacional, o bioetanol pode ser corrosivo para certos materiais, porém se dissolve facilmente em água e é biodegradável (ELLIS; TANNEBERGER, 2015b).

4.2.3 Metanol

O metanol é um líquido incolor, volátil e inflamável amplamente utilizado na indústria como reagente químico, solvente e anticongelante. Ele também desempenha um papel importante na produção de biodiesel, sendo usado como reagente na reação de transesterificação.

Recentemente, o metanol tem despertado interesse como um combustível alternativo para navios devido à sua abundância e custo de produção relativamente baixo. Assim como o etanol, o metanol é compatível com motores a diesel marítimos multicompostíveis.

Existem diversas matérias-primas que podem ser utilizadas na produção de metanol, e sua infraestrutura de transporte e distribuição já está bem estabelecida, especialmente quando produzidos a partir de metano, que é a forma mais econômica de produção em escala industrial.

No processo de produção de metanol a partir de metano, o gás natural é misturado com vapor, aquecido e submetido a um catalisador em um reformador a vapor. O gás/vapor é convertido em gás de síntese, que posteriormente é pressurizado e convertido em metanol

usando outro catalisador. Em seguida, ocorre uma destilação para remover água e impurezas, resultando no metanol puro. Os catalisadores mais eficientes para a síntese de metanol são compostos de cobre, níquel, paládio e platina.

Além do gás natural, o metanol também pode ser produzido a partir do carvão, principalmente na China. A produção de metanol a partir de biomassa também é possível, mas a maioria dos projetos de grande escala para desenvolver essas tecnologias está atualmente estagnada.

Ademais, o metanol possibilita uma redução significativa da emissão de poluentes atmosféricos e de GEE (BRYNOLF; FRIDELL; ANDERSSON, 2014).

O metanol possui uma vantagem sobre o GNL e os outros combustíveis gasosos: seu estado líquido à temperatura ambiente, mais compatível com a infraestrutura de combustível líquido já existente, podendo ser capaz de reaproveitar a infraestrutura de navios existentes. Mas, a baixa densidade energética o prejudica em relação a embarcações em alto mar, porque o abastecimento do combustível é necessário em uma frequência 2 ou até 3 vezes maior em comparação aos atuais combustíveis marítimos.

O metanol apresenta vantagens significativas em relação ao armazenamento em comparação ao GNL, tornando-o uma opção mais fácil e econômica de ser utilizada a bordo de embarcações. A adaptação dos tanques de uma embarcação para armazenar metanol líquido é mais simples do que a instalação de tanques de GNL. Empresas como MAN e Wartsila desenvolveram motores navais projetados especificamente para operar com metanol.

Alguns países já estão realizando testes com metanol como combustível marítimo, como a Alemanha (balsa RoPax, Stena Germanica), o Canadá (Waterfront Shipping, que opera atualmente navios projetados para transporte de cargas) e a Suécia (barco-piloto de alta velocidade). A Maersk encomendou 12 porta-contêineres de 16 mil TEU que podem operar tanto com combustíveis tradicionais quanto com metanol. O primeiro navio será entregue em setembro de 2023 e será batizado em uma cerimônia em Copenhague. Portanto, o metanol é uma alternativa viável e com perspectivas de crescimento no setor marítimo.

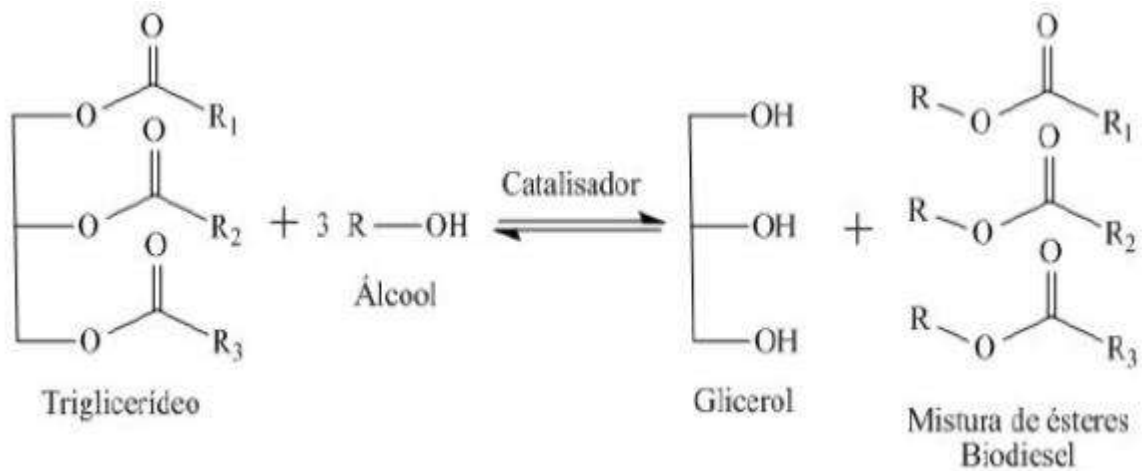
4.2.4 Biodiesel

Um biocombustível é um tipo de combustível obtido a partir de fontes renováveis de biomassa, com o objetivo de substituir, parcial ou totalmente, os combustíveis fósseis em motores de combustão interna ou outras formas de geração de energia. Atualmente, um dos biocombustíveis mais estudados é o biodiesel.

De acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o biodiesel é composto por ésteres alquílicos de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou gorduras animais. Sua produção envolve a reação de um óleo vegetal ou gordura animal com um álcool na presença de um catalisador, resultando na obtenção de glicerina e biodiesel.

O biodiesel é um combustível renovável derivado de óleos vegetais, como girassol, mamona, soja, dendê e outras plantas oleaginosas, além de gorduras animais e é produzido majoritariamente por um processo chamado transesterificação, onde vários óleos (triglicerídeos) são convertidos em ésteres metílicos (Figura 30).

Figura 30 - Transesterificação de triglicerídeos com metanol para glicerol e ésteres metílicos para a produção de ésteres metílicos de ácidos graxos.



FONTE: Otimização das variáveis reacionais no processo de obtenção do biodiesel de soja, 2013.

O biodiesel é considerado um combustível vantajoso, pois pode substituir total ou parcialmente o óleo diesel em motores de ciclo diesel, sem exigir adaptações mecânicas, dependendo da proporção de biodiesel na mistura. É um combustível limpo e renovável, biodegradável, não-tóxico e praticamente isento de enxofre, o que resulta em emissões reduzidas de gases prejudiciais durante a queima.

Suas principais vantagens para uso como combustível marítimo são a densidade energética e a maturidade tecnológica alcançada. Além disso, o biodiesel se beneficia de um mercado e uma rede de distribuição consolidados, o que contribui para sua competitividade, especialmente a curto prazo.

Além de ser uma alternativa para a substituição gradual dos combustíveis minerais derivados do petróleo, o biodiesel apresenta vantagens como a geração de emprego e renda no

setor agrícola, contribuição para a sustentabilidade nacional, menor custo de produção em comparação aos derivados de petróleo, e facilidade no transporte e armazenamento devido ao menor risco de explosão.

Por outro lado, o biodiesel entrega um rendimento menor quando comparado com os combustíveis fósseis, porque, durante sua produção gera grande quantidade de glicerina e emissão de óxido de nitrogênio.

Além do mais, segundo estudos realizados sobre a utilização do biodiesel em ambiente marítimos pela U.S. Maritime Administration (MARAD), o biodiesel se degrada duas vezes mais rápido que o diesel comum, obrigando então o seu consumo de maneira mais rápida. Esse estudo também verificou que o biodiesel tem menor poder calorífico que o diesel convencional, resultando no aumento do consumo de combustível e afetando a autonomia dos navios.

A produção de biodiesel 100% renovável envolve o uso de álcoois renováveis durante o processo de transesterificação, o que pode resultar em custos mais elevados para o combustível. E ainda, a atual utilização do biodiesel no setor de transporte rodoviário e as preocupações relacionadas à sustentabilidade podem reduzir seu apelo para o setor de transportes marítimos (SSI, 2019).

A Alemanha, França e Itália são os principais produtores e consumidores de biodiesel, sendo que esses países fornecem subsídios para incentivar o cultivo de matérias-primas oleaginosas em áreas não utilizadas e oferecem isenção de 90% de impostos. No Brasil, de acordo com o Ministério das Minas e Energia, a produção anual de biodiesel é estimada em 800 milhões de litros, o que contribuiria para reduzir as importações de diesel de petróleo, que chegam a 4 bilhões de litros.

Atualmente, no Brasil, a Petrobras vem testando o uso da mistura de óleo combustível marítimo convencional (bunker) com biodiesel. Em dezembro de 2022, na virada para 2023, a embarcação Darcy Ribeiro, da Transpetro, foi abastecida com uma mistura de 90% de bunker e 10% de biodiesel, no Terminal de Rio Grande (Terig), no Rio Grande do Sul.

Conforme dados fornecidos pela Petrobras, o conteúdo desse combustível é mais eficaz para diminuir os impactos dos gases de efeito estufa (GEE) em relação ao bunker puro, com isso, calcula-se que a redução de emissões de dióxido de carbono (CO₂) pode chegar a aproximadamente 7% com a mistura.

Ao longo de 40 dias, avaliou-se as questões logísticas, qualidade da queima e estabilidade do combustível marítimo com menor pegada de carbono e não foram constatadas ocorrências atípicas no motor do navio e nos sistemas de tratamento do combustível.

Uma vez que não foram encontrados nenhum problema na mistura com 10% de biodiesel, a Petrobras partiu, então, para uma mistura de 76% bunker e 24% de biodiesel. Nesse caso, o navio será abastecido com 573 m³ da mistura no terminal da Transpetro no Porto de Rio Grande e vai navegar durante 2 meses.

A ideia é acompanhar o desempenho do navio registrando dados sobre consumo, potência desenvolvida, distância percorrida, além do desempenho do combustível em filtros e sistemas de purificação. Segundo as contas da Petrobras, a mistura vai reduzir em cerca de 17% das emissões de gases do efeito estufa da embarcação.

4.2.5 Amônia

A amônia é uma fonte de energia limpa estável projetada para ser muito utilizada no futuro, é, atualmente, um composto químico muito utilizado na agricultura como fertilizante, porém, ela também pode ser usada como uma transportadora de energia altamente eficiente. Além disso, possui algumas vantagens em relação ao hidrogênio.

A amônia é amplamente utilizada como produto químico, sendo essencial na produção de fertilizantes, produtos farmacêuticos, água purificada e em diversas outras aplicações químicas. A experiência da indústria química e de fertilizantes, juntamente com os avanços recentes no abastecimento de GNL, contribui para o processo de utilização da amônia como combustível marítimo.

Embora a indústria de fertilizantes possua uma infraestrutura global para a produção, armazenamento e distribuição de amônia, com mais de 100 anos de experiência e um histórico de segurança, é importante ressaltar que serão necessários investimentos significativos para seu uso como combustível marítimo. Isso ocorre devido à atual capacidade de produção mundial da amônia estar direcionada principalmente para a indústria de fertilizantes. Além disso, a produção em larga escala de amônia apresenta desafios técnicos e custos elevados.

Assim como o H₂, a amônia verde apresenta como principal vantagem a capacidade de reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e poluentes atmosféricos, com exceção dos óxidos de nitrogênio (NO_x).

Quando comparada com o hidrogênio, o principal benefício da amônia vem da sua densidade mais alta e do fator armazenamento, já que ela pode ser armazenada como um líquido a -33 °C e a pressão ambiente a bordo do navio e nas instalações portuárias.

A amônia pode ser utilizada em motores de combustão interna (MCIs) ou em células de combustível, seja diretamente ou como um vetor energético para o hidrogênio. No entanto, ambas as abordagens enfrentam desafios tecnológicos e técnicos.

No caso dos MCIs, o uso da amônia é dificultado devido às suas propriedades de combustão, conforme apontado por DE VRIES (2019). Quanto às células de combustível, é necessário instalar uma planta a bordo para a conversão da amônia em hidrogênio, e a utilização de células de combustível de alta temperatura ainda está em desenvolvimento. Portanto, pode-se dizer que a tecnologia da amônia ainda não está completamente amadurecida, especialmente para uso como combustível, e possui uma aplicabilidade limitada na frota existente.

Como desvantagem, a baixa densidade energética da amônia a prejudica, uma vez que requer um volume três vezes maior do que o dos combustíveis destilados (ASH; SCARBROUGH, 2019). E ainda, o elevado custo da eletrólise prejudica seu desempenho econômico, porque seu custo é cerca de duas vezes superior aos dos biocombustíveis destilados.

Adicionalmente, o uso da amônia levanta grandes preocupações em relação à segurança da tripulação dos navios devido à sua natureza altamente tóxica e corrosiva. Também pode representar uma ameaça ao meio ambiente marinho, uma vez que sua solubilidade em água dificulta a resposta a possíveis derramamentos no mar. Além disso, as baixas temperaturas de trabalho da amônia exigem cuidados especiais no manuseio.

É importante ressaltar que a amônia pode causar corrosão nos sistemas de contenção e fornecimento de combustível feitos de aço carbono-manganês, aço níquel, ligas de zinco e cobre. Portanto, é necessário o desenvolvimento de vedantes específicos que sejam capazes de lidar com as propriedades corrosivas da amônia.

Em decorrência disso, a amônia tem um potencial significativo para alcançar as metas de redução de GEE da IMO para 2050, caso se viabilize a produção em quantidades suficientes e com energia renovável durante a produção.

4.2.6 Hidrogênio

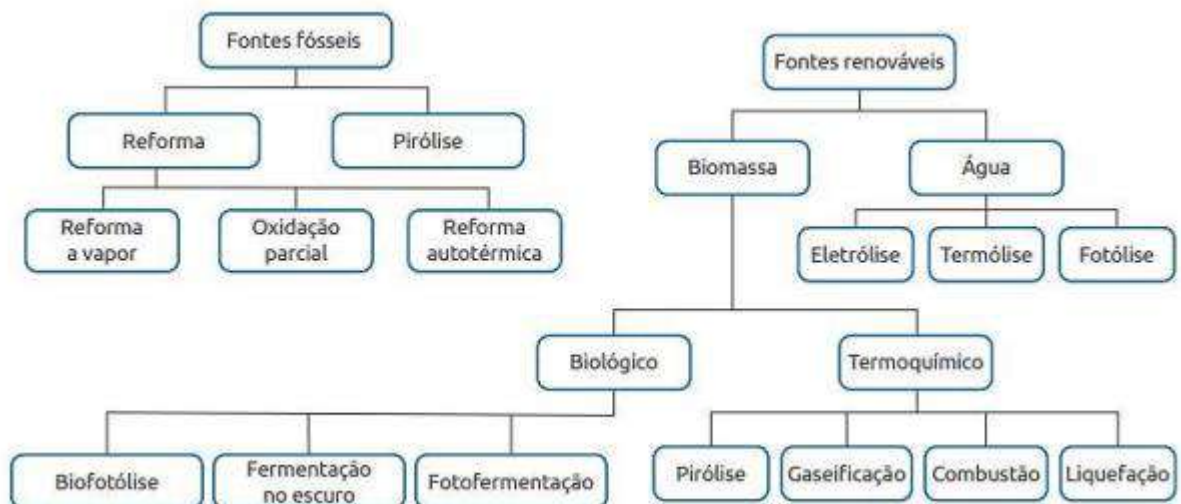
O hidrogênio tem o potencial de impulsionar o desenvolvimento da economia global em direção às metas de redução das emissões de carbono na atmosfera. É amplamente utilizado como matéria-prima na indústria, especialmente no processo de refino de petróleo. No entanto, a maior parte do hidrogênio produzido atualmente é derivada de fontes fósseis, como o gás natural através do processo de reforma a vapor.

A utilização do hidrogênio em pilhas a combustível é a principal alternativa para impulsionar sua adoção na propulsão de navios, embora também seja possível adaptar motores de combustão interna para seu uso. O hidrogênio é o elemento mais abundante no universo, representando cerca de 90% de todos os átomos, e possui uma alta capacidade de armazenamento de energia por unidade de massa. No entanto, sua ocorrência natural é rara, o que leva à produção a partir de compostos contendo hidrogênio, sejam eles de origem fóssil (carvão, óleo ou gás natural), biomassa ou água. Portanto, o hidrogênio é considerado uma fonte energética secundária. Pode ser transportado e armazenado na forma de gás, líquido ou absorvido em materiais.

Existem várias tecnologias disponíveis para a produção de hidrogênio, como a reforma a vapor, a eletrólise, a gaseificação e a hidrólise. A reforma a vapor envolve a produção de hidrogênio a partir de compostos contendo carbono, como o gás natural. A eletrólise é um processo que separa o oxigênio do hidrogênio na água por meio de corrente elétrica. A gaseificação é outra técnica que converte materiais carbonosos, como carvão ou biomassa, em hidrogênio. Por fim, a hidrólise é a produção de hidrogênio a partir da água, também utilizando energia elétrica.

Essas diferentes rotas tecnológicas (Figura 31) permitem a produção de hidrogênio para uso como combustível em pilhas a combustível ou como fonte de energia em vários setores.

Figura 31 - Rotas para a produção de H₂.



FONTA: ESTUDO SOBRE BIOCOMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS PARA MOTOR CICLO OTTO NO BRASIL, NA ARGENTINA E NO PARAGUAI, 2022.

Como vantagens do uso do hidrogênio, têm-se que o uso deste como combustível não provoca emissões diretas de GEE ou de poluentes atmosféricos. Além do mais, o hidrogênio pode ser classificado como um combustível marítimo com emissões quase nulas de gases de efeito estufa (GEE), óxidos de nitrogênio (NOx), óxidos de enxofre (SOx) e partículas. No entanto, para que essa redução seja realmente efetiva, é fundamental que a produção de hidrogênio seja proveniente de fontes de energia renováveis.

Porém, o H₂ também possui as suas desvantagens relevantes para utilização como combustível marítimo, uma delas é sua elevada inflamabilidade, os elevados custos de produção, o transporte e o abastecimento.

É importante destacar que a densidade de energia do hidrogênio é significativamente inferior à dos destilados, como o diesel. Em comparação, é necessário aproximadamente 4,1 vezes o volume de hidrogênio para alcançar a mesma quantidade de energia do diesel. Isso implica na necessidade de aumentar a capacidade dos tanques em mais de 4 vezes, o que pode resultar na perda de espaço de carga, dependendo da configuração do navio. Para rotas muito longas, essa questão pode inviabilizar o uso do hidrogênio como uma alternativa viável.

A disponibilidade tecnológica também apresenta um desafio para a utilização desse combustível, especialmente quando produzido a partir de fontes renováveis. A infraestrutura existente para a produção de hidrogênio é amplamente baseada em fontes não-renováveis, e a produção por meio da eletrólise pode exercer pressão sobre os recursos hídricos. No entanto, é importante ressaltar que o potencial global de geração de energia a partir de fontes renováveis, como solar e eólica, é vasto, o que pode ser uma vantagem para a produção e o uso de hidrogênio verde a longo prazo.

Antecipa-se que os custos das instalações de abastecimento de hidrogênio sejam superiores aos das instalações de GNL, principalmente devido à maior necessidade de armazenamento criogênico de hidrogênio líquido e aos materiais necessários para tanques, tubulações e vedação. Embora o hidrogênio tenha um grande potencial para reduzir as emissões, ainda há um longo caminho a percorrer, tanto na geração sustentável de energia para sua produção quanto na implantação da infraestrutura necessária.

5 CONCLUSÃO

A pesquisa desenvolvida observou num cenário global, e entendendo que é de caráter urgente, a redução de emissões de gases do efeito estufa e de poluentes atmosféricos. Além, de mapear os estudos sobre combustíveis marítimos alternativos, verificando as legislações em vigor, a demanda dos combustíveis atuais e quais as alternativas que existem atualmente para suprir essa necessidade de novos combustíveis marítimos.

Os objetivos do estudo foram alcançados, visto que foi possível identificar os combustíveis marítimos usados atualmente, sendo os principais deles o combustível do tipo bunker e o diesel marítimo. Além disso, verificou-se a existência da IMO, regulamentação mais importante para o transporte marítimo.

Observou-se que existem algumas possibilidades de diminuição da emissão de gases do efeito estufa e poluentes atmosféricos advindos do transporte marítimo.

Constatou-se que a busca por fontes de energia alternativas já foi iniciada e está em processo de avaliação e testes, fato constatado pelos vários trabalhos relacionados a combustíveis marítimos alternativos encontrados.

Quando se tratando de novas propostas, destacam-se a instalação de um dispositivo scrubber, para a purificação de gases de escape, removendo os poluentes e a mudança no tipo de combustível a ser utilizado pela embarcação para o diesel marítimo ou LSFO, a fim de diminuir o teor de enxofre a ser liberado.

Quando verificada a qualidade de novos combustíveis, verificou-se que existem seis principais que estão em maior destaque, são eles: GNL, Etanol, Metanol, Biodiesel, Amônia e Hidrogênio. Todos esses possuem suas características, vantagens e desvantagens específicas. Conforme identificado, avaliando individualmente cada um dos seis combustíveis levantados, é evidente que, na maioria deles existe a necessidade de mudanças no design e na construção de novos navios, assim como será necessário investimentos vultuosos em infraestruturas voltadas para distribuição, armazenamento e abastecimento desses. Ademais, pode-se também verificar que existem diferenças temporais entre eles, sendo assim, pode-se concluir que a amônia e o hidrogênio são soluções de longo prazo, em contrapartida, o GNL, metanol e biodiesel são soluções de médio prazo e, o etanol, por sua vez, é uma alternativa de curto prazo.

Esse estudo contribui para o melhor entendimento do futuro do mercado de combustíveis marítimos, se adequando ao que o setor de navegação exige nos dias de hoje, conforme a legislações que devem ser seguidas.

6 RECOMENDAÇÕES

Considerando-se que nenhum conhecimento é finito, recomenda-se revisões e atualizações contínuas mediante o surgimento de novas diretrizes e protocolos referentes aos combustíveis marítimos.

Além disso, podem ser desenvolvidos estudos futuros para avaliar a aplicação dos combustíveis levantados nas embarcações, checar se realmente se concretizou a redução de emissão de teor de enxofre em até 0,5%, não só nas ECAs, e também verificar a emissão de gases do efeito estufa.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT Online. **O que é GEE?** Disponível em: <https://www.abntonline.com.br/sustentabilidade/GHG/O_que_%C3%A9_gee>. Acesso em: 28 jun. 2023.

ÁLVAREZ, Paula Sáez. **From maritime salvage to IMO 2020 strategy: Two actions to protect the environment.** Marine Pollution Bulletin, v. 170, p. 112590, 2021. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112590>.

ANUÁRIO CNT DO TRANSPORTE, 2022. **Estatísticas Consolidadas.** Disponível em: <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022/>. Acesso em: 29 jun. 2023.

APLICADA, E. "Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” **Impactos na economia brasileira , pela substituição dos combustíveis fósseis por etanol e biodiesel , no período de 2010 a 2030** Jeronimo Alves dos Santos Piracicaba Jeronimo Alve", 2013. .

ASARIOTIS, R. et al. **Review of Maritime Transport 2018.** 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520: informação e documentação: citações em documentos: apresentação.** Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação.** Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6024: informação e documentação: numeração progressiva das seções de um documento escrito: apresentação.** Rio de Janeiro, 2012.

AUGUSTO, L., NOGUEIRA, H. "BIOCOMBUSTÍVEIS NA AMERICA LATINA SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS", n. 1, p. 1–71, 2007. .

Bengtsson, S., Andersson, K., & Fridell, E. (2011). **A comparative life cycle assessment of marine fuels: Liquefied natural gas and three other fossil fuels.** Journal of Engineering for the Maritime Environment, 225(1), 13. <https://doi.org/10.1177/1475090211402136>

BIP Brasil. **Novo cenário de oferta de óleo bunker no Brasil.** Disponível em: <<https://bipbrasil.com.br/novo-cenario-de-oferta-de-oleo-bunker-no-brasil/>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

Brasil Escola. **Aquecimento global.** Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/geografia/aquecimento-global.htm>>. Acesso em: 28 jun. 2023.

Brasil Escola. **Gás Natural Liquefeito (GNL)**. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/geografia/gas-natural-liquefeito.htm>>. Acesso em: 29 jun. 2023.

BRYNOLF, Selma; FRIDELL, Erik; ANDERSSON, Karin. **Environmental assessment of marine fuels: liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol**. Journal of cleaner production, v. 74, p. 86-95, 2014.

Buhaug, Ø. and Corbett, J.J. and Endresen, Ø. and Eyring, V. and Faber, J. and Hanayama, S. and Lee, D. S. and Lee, D. and Lindstad, H. and Markowska, A.Z. and Mjelde, A. and Nelissen, D. and Nilsen, J. and Pålsson, C. and Winebrake, J.J. and Wu, W.-Q. and Yoshida, K. (2009) **Second IMO GHG study 2009**. Other. International Maritime Organization (IMO).

Câmara dos Deputados. **Decreto Legislativo nº 60, de 19 de abril de 1995**. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decleg/1995/decretolegislativo-60-19-abril-1995-358408-exposicaodemotivos-156143-pl.html>>. Acesso em: 28 jun. 2023.

CANABARRO, N. I., SILVA-ORTIZ, P., NOGUEIRA, L. A. H., *et al.* "Sustainability assessment of ethanol and biodiesel production in Argentina, Brazil, Colombia, and Guatemala", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 171, n. November 2022, p. 113019, 2023. DOI: 10.1016/j.rser.2022.113019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113019>.

Capitania dos Portos. MARPOL - **Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios**. Disponível em: <<https://www.ccaimo.mar.mil.br/ccaimo/marpol>>. Acesso em: 28 jun. 2023.

CENTRO BRASILEIRO DE INFRAESTRUTURA. CBIE. **Qual o combustível usado por navios?** Disponível em: <https://cbie.com.br/artigos/qual-o-combustivel-usado-por-navios/#:~:text=Atualmente%2C%20o%20combust%3%ADvel%20utilizado%20pela,bunke r%20oil>. Acesso em: 28 de Junho de 2023.

CETESB - QUALIDADE DO AR. **Poluentes**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>. Acesso em: 23 jun. 2023.

CNN Brasil. **Combustível que abastece navios tem alta de 100% em cinco meses, diz Petrobras**. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/economia/combustivel-que-abastece-navios-tem-alta-de-100-em-cinco-meses-diz-petrobras/>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2017: relatório gerencial**. Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2017. Disponível em: <[http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20\(2017\)%20-%20ALTA.pdf](http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20(2017)%20-%20ALTA.pdf)>. Acesso em: 29 de Junho de 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Transporte rodoviário: desempenho do setor, infraestrutura e investimentos**. Brasília: CNT, 2017. Disponível em: <http://cms.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/Estudos%20CNT/estudo_transporte_rodoviario_infraestrutura.pdf>. Acesso em: 29 de Junho de 2023.

DE, S. "Anuário Estatístico de Transportes", 2021.

DEZ, J. "DA MARITIME LAW ACADEMY International Law and Business Review", [S.d.].

DIÁRIO DO TRANSPORTE. **Transportes são responsáveis por 25% das emissões globais e veículos leves são os grandes vilões da poluição, diz estudo de 40 organizações internacionais**. Disponível em: <https://diariodotransporte.com.br/2018/12/11/transportes-sao-responsaveis-por-25-das-emissoes-globais-e-veiculos-leves-sao-os-grandes-viloes-diz-estudo-de-40-organizacoes-internacionais/>. Acesso em: 6 jul. 2023.

DNV GL. (2018). **Maritime Forecast To 2050**. Høvik, Norway: DNV GL. Retrieved from <https://eto.dnvgl.com/2018/maritime>

DRUMM, F. C. et al. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Digital: **Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores**. 18. ed. RS: Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas - UFSM, Santa Maria, 2014. p. 66-78.

ELLIS, Joanne; TANNEBERGER, Kim. **Study on the use of ethyl and methyl alcohol as alternative fuels in shipping**. Eur. Marit. Saf. Agency, v. 46, p. 1-38, 2015.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Combustíveis**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/o-que-sao-combustiveis>>. Acesso em: 30 jun. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Fontes de Energia**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia>. Acesso em: 1 jul. 2023.

Energia e Ambiente. **Qual a diferença entre gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos?** Disponível em: <<https://energiaeambiente.org.br/qual-a-diferenca-entre-gases-de-efeito-estufa-e-poluente-atmosfericos-20220511>>. Acesso em: 28 jun. 2023.

Esfera Energia. **Fontes de energia: energia petróleo**. Disponível em: <<https://blog.esferaenergia.com.br/fontes-de-energia/energia-petroleo>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

EYRING, V. et al. **Emissions from international shipping: 2. Impact of future technologies on scenarios until 2050**. Journal of Geophysical Research D: Atmospheres, 16 set. 2005.

FONSECA, João José Saraiva da. **Apostila de metodologia de pesquisa**. Universidade Estadual do Ceará, 2002.

Fras-le. **Combustível alternativo**. Disponível em: <<https://blog.fras-le.com/combustivel-alternativo/>>. Acesso em: 29 jun. 2023.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa. Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural - SEAD/UFRGS**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GNPW. **O que é o Gás Natural Liquefeito (GNL)?** Disponível em: <<https://www.gnpw.com.br/energia-limpa/o-que-e-o-gas-natural-liquefeito/>>. Acesso em: 29 jun. 2023.

Goldenergy. **Combustíveis alternativos**. Disponível em: <<https://goldenergy.pt/glossario/combustiveis-alternativos/>>. Acesso em: 29 jun. 2023.

HSIEH, C. C.; FELBY, C. **Biofuels for the Marine Shipping Sector**. IEA Bioenergy. 2017.

IAEA. **Safety Reports Series No. 77 Safety Assessment for Decommissioning IAEA SAFETY STANDARDS AND RELATED PUBLICATIONS**. . [S.l: s.n.], [S.d.].

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS. **Produção primária de energia no Brasil**. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/producao-primaria-de-energia-no-brasil/>. Acesso em: 1 jul. 2023.

Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP). **Produção primária de energia no Brasil**. Disponível em: <<https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/producao-primaria-de-energia-no-brasil/>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

International Maritime Organization (IMO). Disponível em: <<https://www.imo.org/>>. Acesso em: 28 jun. 2023.

IPEIA, 2011. **Poluição Veicular Atmosférica**. No 313 Disponível em: <www.cnt.org.br/Imagens%20CNT/.../comunicado_ipea220911.pdf> Acesso em 29 de junho de 2023.

KUMAR, S. e HOFFMANN, J. Globalisation: the maritime nexus. In: Grammenos, C. Th. (ed) **The handbook of maritime economics and business**. London, United Kingdom: LLP, 2002.

LACERDA, Sander Magalhães. **Transporte Marítimo de longo curso no Brasil e no mundo**: -. REVISTA DO BNDES, Rio de Janeiro, v. 11, n. 21, p. 209-232, jun./2004. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/16980/1/PRArt153542_Transporte%20Mar

%C3%ADtimo%20de%20Longo%20Curso%20no%20Brasil%20e%20no%20Mundo_P.pdf.

Acesso em: 29 jun. 2023.

Lange, Beate, Till Markus, and Lutz P. Helfst. "**Impacts of scrubbers on the environmental situation in ports and coastal waters.**" *Texto 65* (2015): 2015.

LI, Kevin et al. **Determinants of ship operators' options for compliance with IMO 2020.** *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 86, p. 102459, 2020. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102459>.

LOUREIRO L. N.; **Panorâmica Sobre Emissões Atmosféricas Estudo De Caso: Avaliação Do Inventário Emissões Atmosféricas da Região Metropolitana Do Rio De Janeiro Para Fontes Móveis.** Tese Universidade federal do Rio de Janeiro, 2005.

MCCORMICK, Robert L.; PARISH, Richard. **Milestone report: technical barriers to the use of ethanol in diesel fuel.** 2001.

"**Modal características**". v. 1, p. 1–7, 2008. .

MONEY TIMES. **O petróleo está com seus dias 'contados', mas até lá essa ação de petroleira tem potencial para mais do que dobrar o seu patrimônio; conheça** . Disponível em: <https://www.moneytimes.com.br/conteudo-de-marca/o-petroleo-esta-com-seus-dias-contados-mas-ate-la-essa-acao-de-petroleira-tem-potencial-para-mais-do-que-dobrar-o-seu-patrimonio-conheca-lbdris024/>. Acesso em: 20 jun. 2023.

MOTA, S. **Impactos ambientais das atividades humanas. Introdução à engenharia ambiental.** 2.ed. Rio de Janeiro: ABES, 2000.

Mundo Educação. **Combustíveis fósseis.** Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/combustiveis-fosseis.htm>. Acesso em: 30 jun. 2023.

Mundo Educação. **Combustíveis.** Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/combustiveis.htm>. Acesso em: 30 jun. 2023.

MUSSO, E. (2004) **Economia Marittima e Portuale.** University of Genoa. Gênova, Itália.

NEVES, José Luis. **Pesquisa qualitativa: características, usos e possibilidades.** Caderno de pesquisas em administração, São Paulo, v. 1, n. 3, p. 1-5, 1996.

NOBRE, M., SANTOS, F. R. dos. "**O mercado de transporte marítimo: especialização, evolução e os reflexos na logística internacional**", *Simpep 2005*, n. November 2005, 2005.

Disponível em: http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_12/copiar.php?arquivo=NOBRE_M_O_mercado_de_transport.pdf.

Olhar Digital. **Combustível ecológico: amônia para navios.** Disponível em: <<https://olhardigital.com.br/2021/03/02/carros-e-tecnologia/combustivel-ecologico-amonia-navios/>>. Acesso em: 29 jun. 2023.

Parlamento Europeu, 2005. **Directive 2005/33/EC of the European Parliament and of the Council of 6 July 2005 amending Directive 1999/32/EC European Commission.** Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32005L0033>. Acesso em: 07 jul. 2023.

PEREIRA JR., N. (2008) **Biomass of lignocellulosic composition for fuel ethanol production within the context of biorefinery.** In. series on biotechnology. Ed. Nei Pereira Jr. Amiga Digital. Escola de Química/UFRJ. ISBN 978-85- 903967-3-4.

Petrobras. **Óleo Diesel Marítimo.** Disponível em: <<https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/produtos/maritimos/oleo-diesel-maritimo/>>. Acesso em: 30 jun. 2023.

PETROBRAS. "Combustíveis Marítimos", p. 1–11, 2021. Disponível em: https://petrobras.com.br/data/files/02/83/FA/2C/5A39C710E2EF93B7B8E99EA8/Manual_Combustiveis_Maritimos_2021.pdf.

PIMENTA, Milena Varella; MARTINS, Monique Mota. **COMBUSTÍVEIS MARÍTIMOS ALTERNATIVOS: RELEVÂNCIA E VIABILIDADE: ALTERNATIVE MARINE FUELS: RELEVANCE AND VIABILITY. EVISTA DE DIREITO E NEGÓCIOS INTERNACIONAIS DAMARITIME LAW ACADEMY -MLAWINTERNATIONAL LAW AND BUSINESS REVIEW,** Rio de Janeiro, v. 1, n. 2, p. 32-53, dez./2021.

Portos e Navios. **Maersk batizará o 1º porta-contêineres movido a metanol do mundo em setembro.** Disponível em: <<https://www.portosenavios.com.br/noticias/ind-naval-e-offshore/maersk-batizara-o-1-porta-conteineres-movido-a-metanol-do-mundo-em-setembro>>. Acesso em: 28 de Junho de 2023.

PORTOS E NAVIOS. **O maior navio de contêineres movido a GNL do mundo faz sua primeira chamada no Reino Unido. 2020.** Disponível em: <https://www.portosenavios.com.br/noticias/navegacao-e-marinha/o-maior-navio-de-conteineresmovido-a-gnl-do-mundo-faz-sua-primeira-chamada-no-reino-unido>. Acesso em: 29 de junho de 2023.

Portos e Navios. **Refinarias aumentam a produção de combustível para navios em conformidade com a IMO 2020.** Disponível em: <<https://www.portosenavios.com.br/noticias/navegacao-e-marinha/refinarias-aumentam-a->

producao-de-combustivel-para-navios-em-conformidade-com-a-imo-2020>. Acesso em: 29 jun. 2023.

RenovaBio. **O que são combustíveis renováveis?** Disponível em: <<https://www.renovabio.org/o-que-sao-combustiveis-renovaveis/>>. Acesso em: 30 jun. 2023.

SEA LNG. **Bunker Navigator**. Disponível em: <https://sea-lng.org/bunker-navigator/>. Acesso em: 29 de junho de 2023.

SILVA, LISIANE VASCONCELLOS DA et al. **Metodologia de Pesquisa Em Administração: Uma Abordagem Prática**. Editora Unisinos, 2012.

Silva, M. S. C. R. P. (2008). **Avaliação e remediação de zona contaminada por hidrocarbonetos**. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.

SOUSA, C., DELGADO, F., MAIA, F., *et al.* "Distribuição De Combustíveis Marítimos No Brasil , Em Conformidade Com O Imo 2020 :", **Fgv Energia**, p. 17, 2020.

SUSTENTÁVEL, M. "TECNOLOGIA AZUL COMO ROTA PARA O TRANSPORTE Setembro", 2021.

TAMUG, T. L., TAMUG, S. B., TAMUG, J. M. "Emissions Reduction in Shipping Beyond Slow Steaming Emissions Reduction in Shipping Beyond Slow Steaming 1 . Introduction Mitigating Greenhouse Gas emissions has been a hot topic for the shipping industry in recent years . Without out a true way to measu", p. 175–187, 2020. .

VAN, T. C.; RAMIREZ, J.; RAINEY, T.; RISTOVSKI, Z.; BROWN, R. J. **Global impacts of recent IMO regulations on marine fuel oil refining processes and ship emissions**. Transportation Research Part D: Transport and Environment, [S.L.], v. 70, p. 123-134, maio 2019. Elsevier BV.

WWF Brasil. **Efeito estufa e mudanças climáticas**. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/nossosconteudos/educacaoambiental/conceitos/efeitoestufa_e_mudancasclimaticas/>. Acesso em: 28 jun. 2023.

ZHU, Mo et al. **How can shipowners comply with the 2020 global sulphur limit economically?** Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 79, p. 102234, 2020. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102234>.