



**CENTRO UNIVERSITÁRIO RITTER DOS REIS**  
**ÂNIMA EDUCAÇÃO**  
**JORDAN ENZO KALSING**

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE MANTER MOTORES CICLO DIESEL EM  
OPERAÇÃO NOS SERVIÇOS EXTRAPESADOS, DIANTE DA ATUAL  
DEFICIÊNCIA ENERGÉTICA APRESENTADA POR BATERIAS**

Canoas  
2023

**JORDAN ENZO KALSING**

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE MANTER MOTORES CICLO DIESEL EM  
OPERAÇÃO NOS SERVIÇOS EXTRAPESADOS, DIANTE DA ATUAL  
DEFICIÊNCIA ENERGÉTICA APRESENTADA POR BATERIAS**

Trabalho de conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Universitário Uniritter, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Sérgio Luiz Telles Bartex, Dr.

Canoas  
2023

**JORDAN ENZO KALSING**

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE MANTER MOTORES CICLO DIESEL EM  
OPERAÇÃO NOS SERVIÇOS EXTRAPESADOS, DIANTE DA ATUAL  
DEFICIÊNCIA ENERGÉTICA APRESENTADA POR BATERIAS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário Ritter dos Reis.

Canoas, RS, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2023.

Professor e Orientador Orientador: Prof. Sérgio Luiz Telles Bartex, Dr.  
Centro Universitário Ritter dos Reis

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos aqueles que participaram da minha trajetória nesta jornada, direta ou indiretamente, no desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado. À minha família, que me incentivou nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho. Agradeço os professores do Centro Universitário Ritter dos Reis pelo conhecimento transmitido a mim ao longo do curso, mas principalmente, ao meu orientador Sérgio Bartex, pois sem ele, não seria possível chegar até aqui.

## RESUMO

Historicamente, há uma estreita ligação entre transporte e petróleo: 93% da energia utilizada nos transportes provem de derivados de petróleo. Esse é o motivo em que se baseia a transição energética que vem ditando os passos do futuro, uma vez que, a nível global, o setor dos transportes é o segundo maior contribuinte para as emissões antropogênicas de gases com efeito estufa. Diante da preocupação com os gases estufa, governos do mundo todo começaram a impor normas limitando a poluição, afim de controlar as emissões. O presente trabalho busca evidenciar se é possível uma transição total imediata para operações de navios extrapesados, baseando-se, principalmente, em graneleiros da classe *Suezmax*. Utilizando de bibliografia nacional e estrangeira, das quais livros seminais, legislações vigentes, legislações futuras, catálogos de fabricantes e pesquisas na área, foram selecionados artigos e dados condizentes com o tema proposto nesta pesquisa. Para a seleção dos dados a serem validados, foi utilizada a observação e uma análise cruzada das informações obtidas. Como resultados, foram obtidos dados constatando que o navio apresentado se enquadra nos níveis de emissões estipulados, apenas utilizando a redução de energia pelo EPL. Com a utilização do EPL, reduzindo algo em torno de 33,5% da potência do motor, foi possível reduzir em 53,5% as emissões de CO<sub>2</sub>. Para isso, a rotação do motor foi reduzida em 10 rpm. Da mesma forma, foi calculado o tempo de viagem na rota Paranaguá, Brasil – Roterdã, Holanda, para ver qual seria o impacto da redução de velocidade de cruzeiro no tempo final de viagem. Houve 22,5% de aumento. Entretanto, para o cálculo suposto de baterias, estas ainda se mostram extremamente inviáveis. Quanto ao custo da bateria, essa seria a maior inviabilidade, pois o valor gasto para adquirir uma unidade com as características necessárias, seria da ordem de grandeza de que o navio poderia fazer aproximadamente 3.700 viagens na rota mencionada, ao mesmo custo da aquisição. Isso sem mencionar os custos em decorrência de modificações, instalação, treinamento de pessoal e carga da mesma. Diante do que fora obtido, conclui-se que no atual momento, é impensável a substituição da propulsão a diesel nos serviços extrapesados.

Palavras-chave: Navios. Baterias. IMO. EPL. Eficiência. Diesel. Combustíveis. Propulsão.

## ABSTRACT

Historically, there is a close connection between transport and oil: 93% of the energy used in transport comes from oil derivatives. This is the reason for the energy transition that has been dictating the steps of the future, since, worldwide, the transport sector is the second largest responsible for anthropogenic emissions of greenhouse gases. In the face of concern about greenhouse gases, governments around the world have begun to impose regulations that limit pollution to control emissions. The present work seeks to demonstrate whether an immediate full transition to extra-heavy vessel operations, based mainly on Suezmax-class bulk carriers, is possible. Using national and foreign bibliography, including seminal books, current legislation, future legislation, manufacturers' catalogs and research in the area, articles and data consistent with the theme proposed in this research were selected. For the selection of data to be validated, observation and cross-analysis of the information obtained were used. As a result, data were obtained noting that the ship presented fits the stipulated emission levels, using only the energy reduction by the EPL. With the use of EPL, reducing something around 33.5% of engine power, it was possible to reduce CO<sub>2</sub> emissions by 53.5%. For this, the engine speed was reduced by 10 rpm. Likewise, the travel time on the Paranaguá, Brazil – Rotterdam, Netherlands route was calculated to see what the impact of reducing cruising speed would be on the final travel time. There was an increase of 22.5%. However, for the supposed calculation of batteries, these are still extremely impracticable. As for the cost of the battery, this would be the biggest unfeasibility, since the amount spent to acquire a unit with the necessary characteristics would be of the order of magnitude that the ship could make approximately 3,700 trips on the mentioned route, at the same acquisition cost. Not to mention the cost of modifications, installation, staff training and cargo. In view of what was obtained, it is concluded that, currently, it is unthinkable to replace diesel propulsion in extra-heavy services.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Navio graneleiro
- Figura 2 – Navio tanque
- Figura 3 – Navio petroleiro
- Figura 4 – Navio gaseiro
- Figura 5 – Navio Ro-Ro
- Figura 6 – Navio de carga geral
- Figura 7 – Navio porta-contêineres
- Figura 8 – Cálculo do CII
- Figura 9 – Demanda e utilizações das baterias
- Figura 10 – Evolução da capacidade média das baterias
- Figura 11 – Fluxograma de como a pesquisa foi estruturada
- Figura 12 – Cálculo do EEXI
- Figura 13 – Informações gerais
- Figura 14 – Principais detalhes
- Figura 15 – Motor principal
- Figura 16 – Motor auxiliar
- Figura 17 – Velocidade do navio

## LISTA DE SIGLAS

ANP – Agência Nacional do Petróleo

Cf – Fator de conversão adimensional entre o consumo de óleo combustível e a emissão de CO<sub>2</sub>

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

*d* – *draught ou draft* – o calado é a dimensão entre a quilha e a linha de água, quando o navio flutua

*dB* – Calado mínimo

*dL* – Calado máximo

DWT – *Deadweight*

EEDI – Índice de Projeto de Emissões de Energia

EEXI – Índice de Eficiência Energética de Navios Existentes

EPL – Limitação de potência do motor

EV – Veículo elétrico

FA – Fluido Ativo

GT - *Gross Tonnage* ou arqueação bruta

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

GNL – Gás Natural Liquefeito

GWh – Gigawatt-hora

HSFO – *High Sulfur Fuel Oil*

IMO – Organização Marítima Internacional

KM – Quilômetros

KWh – Quilowatt-hora

LFP – Íon de lítio - Cátodo LFP

LOA – *Length overall* – Dimensão longitudinal do navio, em metros

LSFO - *Low Sulfur Fuel Oil*

LTO – Íon - Titanato de Lítio

LWL – *Length at waterline* – Comprimento do navio na linha de flutuação

MARPOL – Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios

MCR – (*Maximum Continuous Rating*) – Saída de potência máxima que o motor pode produzir enquanto funciona continuamente em limites e condições seguras.

MEPC – *Marine Environment Protection Committee*

MGO – *Marine Gas Oil*

MIE – Motor de Ignição Espontânea  
MIF – Motor de Ignição por Faísca  
NCM – Íon de lítio - Cátodo NCM  
NOx – Óxido de Nitrogênio  
ONU – Organização das Nações Unidas  
PCTC - *Pure Car, Truck Carrier*  
PMS – Ponto Morto Superior  
PV – Energia solar fotovoltaica  
Ro-Ro – *Roll on-Roll Off*  
RPM – Rotações Por Minuto  
SFC – Consumo Específico de Combustível  
SOx – Óxido de Enxofre  
TAI - Temperatura de Autoignição  
UE – União Europeia  
VLSFO (*Very Low Sulfur. Fuel Oil*)  
Vref – Velocidade de referência

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	3
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA .....	4
1.2	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	4
1.3	OBJETIVOS DA PESQUISA .....	4
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	4
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	5
1.4	JUSTIFICATIVA .....	5
1.5	ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA .....	6
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	7
2.1	DEFINIÇÃO DE NAVIO.....	7
<b>2.1.1</b>	<b>Termos náuticos</b> .....	7
<b>2.1.2</b>	<b>Classificação dos navios</b> .....	8
2.2	CARACTERÍSTICAS DA PROPULSÃO DOS NAVIOS ATUALMENTE .....	14
<b>2.2.1</b>	<b>Visão geral</b> .....	14
<b>2.2.2</b>	<b>Motores de combustão interna</b> .....	15
2.2.2.1	Motores de 4 tempos.....	15
2.2.2.2	Motores de 2 tempos.....	16
<b>2.2.3</b>	<b>Motores ciclo diesel</b> .....	16
<b>2.2.4</b>	<b>Motores elétricos</b> .....	18
2.2.4.1	Motores elétricos na indústria naval .....	19
2.3	NECESSIDADE DE MUDANÇA COM BASE EM LEGISLAÇÕES .....	20
<b>2.3.1</b>	<b>Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU)</b> .....	20
<b>2.3.2</b>	<b>IMO 2020</b> .....	21
<b>2.3.3</b>	<b>EEDI - Índice de Projeto de Eficiência Energética</b> .....	22
<b>2.3.4</b>	<b>EEXI - Índice de Eficiência Energética de Navios Existentes</b> .....	22

<b>2.3.5</b>	<b>CII – Indicador de Intensidade de Carbono</b> .....	23
2.3.5.1	Cálculo do CII.....	24
2.4	ATUAIS MANEIRAS ESTAR EM CONFORMIDADE COM AS LEGISLAÇÕES 24	
2.5	DEFICIÊNCIA TECNOLÓGICA .....	25
<b>2.5.1</b>	<b>Baterias</b> .....	25
2.5.1.1	Autonomia de veículos elétricos.....	26
2.5.1.2	Deficiência apresentada por baterias .....	28
<b>2.5.2</b>	<b>Custo das baterias marítimas</b> .....	28
2.6	TENDÊNCIAS PARA O FUTURO.....	29
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	30
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA .....	31
3.2	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DA COLETA DE DADOS .....	31
<b>3.2.1</b>	<b>Definição operacional das variáveis</b> .....	31
3.2.1.1	Definição de extrapesado.....	31
3.2.1.2	EEXI - Índice de Eficiência Energética de Navios Existentes.....	32
3.2.1.3	Níveis de emissão de poluentes (SOx) .....	33
3.2.1.4	Níveis de emissão de poluentes (NOx) .....	34
<b>4</b>	<b>VALIDAÇÃO DA PESQUISA</b> .....	35
4.1	CASO EXEMPLO – NAVIO GRANELEIRO .....	35
4.2	CARACTERÍSTICAS DO NAVIO .....	35
4.3	EQUACIONAMENTO DO EXEMPLO .....	37
<b>4.3.1</b>	<b>Cálculo do navio com potência máxima</b> .....	37
<b>4.3.2</b>	<b>Cálculo do navio com potência reduzida</b> .....	37
<b>4.3.3</b>	<b>Redução total</b> .....	38
4.4	CÁLCULO DO TEMPO DE VIAGEM .....	38
<b>4.4.1</b>	<b>Tempo de viagem sem redução de velocidade</b> .....	38

<b>4.4.2</b>	<b>Tempo de viagem com redução de velocidade</b> .....	39
4.5	SUPOSIÇÃO DO ALCANCE DE BATERIAS .....	39
<b>4.5.1</b>	<b>Cálculo da suposição</b> .....	40
4.4.2.1	Valor de uma bateria de capacidade necessária .....	41
4.4.2.2	Valor em diesel para o mesmo fornecimento de energia da bateria .....	41
5.1	ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS .....	42
5.2	DISCUSSÃO .....	43
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	44
6.1	CONCLUSÃO .....	44
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	44
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	45

## 1. INTRODUÇÃO

Historicamente, há uma estreita ligação entre transporte e petróleo: 93% da energia utilizada nos transportes provem de derivados de petróleo. Esse é o motivo em que se baseia a transição energética que vem ditando os passos do futuro, uma vez que, a nível global, o setor dos transportes é o segundo maior contribuinte para as emissões antropogênicas de gases com efeito estufa. (BEAUCHET et al., 2022).

Diante da preocupação com os gases estufa, governos do mundo todo começaram a impor normas limitando a poluição, afim de controlar as emissões. Em 2021, a União Europeia definiu um regulamento de orientações gerais, no qual a estipulou como 2035 a data para o encerramento da produção de veículos a combustão para comercialização interna, ficando apenas com a fabricação destes para exportação, afim de suprir mercados necessitados. (EUROPEAN COMMISSION, 2021).

Como dito, alguns dos maiores causadores do efeito estufa são os veículos automotores, onde vem sendo apresentado que a melhor saída é aposentar os motores a combustão para fazer a eletrificação de frota, desde que seja de baixo carbono. Porém, grandes navios não podem ser impulsionados por motores a bateria, dada a atual tecnologia disponível. Segundo suposições de energia, a eficiência de carga da rede deverá passar de 81% em 2022 para 90% em 2040, enquanto máquinas térmicas devem passar de 39% para 43% no mesmo período. (BEAUCHET et al., 2022).

Como diz Kyunghwa (2018), já existem navios e barcos de pequeno porte totalmente elétricos, mas estes ficam devendo na questão de autonomia e/ou capacidade, a qual é extremamente reduzida em relação aos movidos a óleo combustível. Pesquisas tem sido realizadas para encontrar formas quase que paliativas para os navios de grande porte. Portanto, serão catalogados e analisados os tipos de navios, afim de concluir se estes se adequam ou não em determinada condição.

No presente estudo, pretende-se mostrar que a mudança para navios pesados não é tão simples assim, o que será evidenciado através de pesquisas, coletas de dados e análise das legislações de poluentes. Portanto, será demonstrado se existe alguma saída para que navios pesados tenham a possibilidade de se manter em

funcionamento sem causar uma crise no abastecimento mundial ou o aumento nos gases do efeito estufa.

### 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

A partir das constantes mudanças do mundo, surgem limitações para tecnologias e legislações. Em alguns casos, as legislações criam limitações.

Portanto, qual a solução econômica e ambientalmente correta para a propulsão de navios levando em consideração os requisitos de emissão de poluentes?

### 1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa se delimitará a estudar motivos e formas de manter motores de transportadores pesados, como navios, que operam no ciclo diesel em uso, contornando as emissões de poluentes, as legislações cada vez mais rígidas e os custos. É uma pesquisa necessária, até que se tenha tecnologia e estrutura suficiente para uma mudança na forma de geração, armazenamento e carregamento de energia. A presente análise se dará no período de agosto de 2022 a junho de 2023.

### 1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos do presente trabalho foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos, os quais são apresentados a seguir.

#### 1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é estudar as possíveis soluções para a propulsão de grandes navios, de modo que eles sejam viáveis no âmbito econômico e ambiental.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar uma pesquisa sobre navios e sua propulsão no geral;
- Pesquisar sobre motores ciclo diesel e elétricos, para ter uma melhor compreensão do presente trabalho;
- Compreender os limites econômicos e ambientais do ciclo diesel, afim de poder julgar as análises propostas;
- Buscar formas de contornar os níveis de emissões de poluentes;
- Conhecer as necessidades do transporte marítimo pesado e tecnologias em desenvolvimento;

### 1.4 JUSTIFICATIVA

O crescente aumento da conscientização e utilização de energias mais limpas, bem como o estreitamento das legislações de poluentes, tem feito com que a indústria repense o mercado. Porém, isso tem se mostrado inviável em alguns casos de transporte pesado, como navios, por exemplo. Toda essa preocupação visa melhorar o bem-estar das pessoas, afinal a queima de combustíveis fósseis é uma das maiores responsáveis pelo efeito estufa.

Diante das tecnologias de baterias e carregamento existentes no mundo atual, os poucos e recém lançados (e relativamente pequenos) navios elétricos tem uma autonomia reduzida, variando na casa de 80km a 120km por carga. No futuro, as embarcações não precisarão apenas de autonomia para cobrir grandes distâncias, mas que os terminais portuários também estejam equipados com estações de recarga adaptadas.

No âmbito acadêmico, estão sendo buscadas formas de melhorar a vida das pessoas, de modo que a propulsão dos navios, que hoje é uma das maiores causadoras do efeito estufa, tenha seu nível de emissões reduzido, tendendo a zero. Porém, atentando-se que sempre que há uma mudança benéfica de um lado, do outro há efeitos colaterais, os quais devem ser contornados.

De modo econômico, os estudos são importantes, pois existe um desafio que não é somente tecnológico, mas também propriamente econômico, dadas as

infraestruturas de recarga e geração de energia, que requerem coordenação de muitas partes. Portanto, buscam-se formas de manter motores a combustão em operação até que o mundo esteja preparado para mudança total de geradores.

Por conseguinte, na presente pesquisa buscam-se formas de contornar as dificuldades enfrentadas nos já mencionados problemas, cujos quais afetam o dia-a-dia de todos os habitantes do planeta.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

A seguinte pesquisa está estruturada de forma que consiga dar ao leitor embasamento de julgamento às análises propostas. Portanto, primeiramente, no capítulo 1, serão trazidos os motivos que levaram a escolha deste tema. No capítulo 2, serão apresentadas informações acerca das embarcações, definindo seus tipos, classes e elucidando termos náuticos. A partir daí, serão amostradas características mecânicas e de operação dos navios, explicando os casos específicos que este estudo pretende analisar.

Após esclarecer os casos a serem estudados, tem-se a necessidade de entender as legislações contra poluição vigentes no mundo, para compreender a necessidade de investigação do tema proposto. Em conjunto com as normas de poluição, entram as possíveis soluções para o problema.

Diante disso, busca-se uma análise teórica do assunto, afim de compreender se o futuro da propulsão naval são as baterias, se os motores ciclo diesel ainda tem condições de operação ou qual será a saída da indústria. A resposta será apresentada na conclusão, no capítulo 4.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados os referenciais teóricos da presente pesquisa.

### 2.1 DEFINIÇÃO DE NAVIO

Um navio é uma grande embarcação, tendo, geralmente, tamanho para transportar os seus próprios barcos, como botes salva-vidas, botes ou lanchas. Normalmente, a lei local e órgãos de regulamentação irão definir o tamanho concreto (ou o número de mastros) que um barco deverá ter para ser elevado à categoria de navio. No Brasil, o que caracteriza o navio é o meio em que se desloca e sua utilização para navegação de grande cabotagem e de longo curso, que se dá em alto mar. (AQUASEG, 2012).

#### 2.1.1 Termos náuticos

Termos comumente usados na área náutica acabam confundindo quem não tem um certo conhecimento desse campo. Portanto, aqui serão apresentados os mais comuns. A principal parte estrutural de uma embarcação é o casco. É ele quem dá a flutuabilidade sobre a água. O convés é o plano horizontal principal, que fecha o casco na parte superior. Embarcações maiores podem ter mais de um convés. A proa é a parte da frente, enquanto a popa é a parte de trás. Os bordos são os lados do navio, sendo bombordo o lado esquerdo, com a proa do barco à nossa frente e a popa atrás e estibordo o lado direito, com a proa à nossa frente e a popa atrás. (DOTTORI, 2019).

Quanto às dimensões das embarcações, os principais termos são: comprimento total, que é a dimensão longitudinal do navio, em metros (*LOA*); comprimento na linha de água é o comprimento do navio na linha de flutuação (*LWL*); quilha é a seção central da embarcação, que se estende da proa à popa; o calado é a dimensão entre a quilha e a linha de água, quando o navio flutua (*d*). Existem dois tipos de calado: o calado máximo (*dL*), com o navio carregado; o calado mínimo (*dB*), com o navio não carregado e em condição de lastro. (CAETANO, 2019).

### 2.1.2 Classificação dos navios

Como elencado por Sprenger (2022), temos os seguintes tipos de grandes navios: graneleiro, tanque, petroleiro, gaseiro, Ro-Ro, carga geral e porta-contêineres. Os navios são classificados de acordo com seu peso, seja em DWT, sigla para *Deadweight*, ou peso morto ou em GT, que seria *Gross Tonnage* ou arqueação bruta. A presente pesquisa se dará com foco nas embarcações com DWT igual ou superior a 23.999 DWT.

Os navios graneleiros, do inglês *bulk carrier*, como indica o próprio nome, são feitos para transportar mercadorias a granel, tais como soja, milho, açúcar, minérios, carvão, fertilizantes, entre diversos outros tipos de grãos. (SPRENGER, 2022). Os navios graneleiros são classificados de acordo com seu tamanho, do qual os nomes são baseados nos locais onde eles podem navegar, sendo os *Handysize*, *Seawaymax*, *Handymax*, *Panamax*, *Suezmax* e *Capesize*. (COELHO, 2010).

Existem algumas variações dos tipos de navios graneleiros, sendo elas: Navio Graneleiro Combinado e Navio Graneleiro Combinado Universal. O Primeiro, destina-se ao transporte de graneis sólidos e líquidos, a fim de evitar viagens de lastro. Possui também estruturas dos graneleiros comuns, como um sistema de bombas e respectivas redes para o trato de carga líquida, bem como um sistema adequado para a limpeza e desgaseificação dos tanques. Enquanto o segundo pode transportar minério, graneis líquidos e graneis sólidos leves. (PORTOGENTE, 2016).

Possuem grandes escotilhas hidráulicas que cobrem os porões, onde os produtos são armazenados sem a contagem de unidades, embalagens específicas e identificação de alguma marca comercial. Eles vão carregar e descarregar em terminais portuários especiais para este tipo de cargas, por isso, não podem operar em todos os portos. (SPRENGER, 2022).

**Figura 1 – Navio graneleiro**



Fonte: Dry Cargo Bulk Carriers (2014, p.12).

Já os navios tanque, são utilizados para o transporte de substâncias líquidas. É um tipo de navio projetado e construído para transportar a granel qualquer produto líquido. Assim como produtos químicos industriais, esses navios também costumam transportar outros tipos de carga sensível que exigem um alto padrão de limpeza de tanques, como óleos comestíveis, óleos vegetais e metanol. (SPRENGER, 2022).

Os navios tanque geralmente têm uma capacidade de carga de 5.000 a 40.000 toneladas e, frequentemente, possuem sistemas de carga especializados adequados ao tipo de carga transportada. Esses sistemas podem incluir aparelhos de aquecimento ou resfriamento e sistemas avançados de limpeza, a fim de garantir se a pureza de uma carga é mantida quando carregada em um tanque que pode ter transportado algo diferente. (BHANAWAT, 2018).

**Figura 2 – Navio tanque**



Fonte: Crude Oil & Product Tankers (2013, p.25).

Sendo uma variação do navio tanque, temos os petroleiros, que são construídos especificamente e exclusivo para o transporte de petróleo e seus

derivados, não podendo ser utilizado para acondicionar outros tipos de líquidos. São usados para transportar não só o petróleo bruto, mas também seus derivados, podendo carregar mais de 400 mil toneladas de combustíveis e derivados, sendo assim, os mais pesados navios existentes. Esses navios apresentam um pavimento repleto de canos interligados, os quais distribuem o óleo de modo igualitário para garantir o equilíbrio da embarcação. (SPRENGER, 2022).

Trabalhar em navios tanque é um pouco diferente de outros navios, pois os perigos relacionados às operações de são maiores, exigindo treinamento adicional e precauções de segurança para a seguridade do navio e da tripulação. O carregamento de carga da costa pode ser realizado em diversas formas como por gravidade, por bomba em terra e através de transferência de navio para navio. Os petroleiros, hoje em dia, também carregam óleo diretamente do campo localizado no mar. (BHANAWAT, 2018).

Quando comparados aos outros tipos de navios, os petroleiros se mostram mais largos e menos fundos. Essas características torna os petroleiros capazes de navegar em águas rasas. Contudo, há poucos portos em que os superpetroleiros podem entrar e, portanto, são quase totalmente carregados e descarregados das estações de bombeamento em terra. Ademais, tendo em vista o risco ambiental envolvido, os navios petroleiros têm um casco duplo para dar segurança contra vazamentos. (SPRENGER, 2022).

**Figura 3 – Navio petroleiro**



Fonte: Crude Oil & Product Tankers (2013, p.21).

Navios gaseiros são destinados ao transporte de gases liquefeitos (GLP, GNL, etileno, amônia, propileno, entre outros). São conhecidos pelo formato de seus tanques arredondados, posicionados acima do convés. (SPRENGER, 2022).

O gás liquefeito é a forma líquida de uma substância, a qual na temperatura ambiente e na pressão atmosférica é um gás. A maioria dos gases liquefeitos são hidrocarbonetos, principal fonte de energia do mundo. (LELIS, 2013).

Essas embarcações podem contar com quatro tipos de tanques, sendo eles tanques independentes, tanques de membrana, tanques integrais e tanques de semimembrana. (SPRENGER, 2022).

Para o transporte em navio, os gases são liquefeitos o que reduz seu volume de 300 a 850 vezes. Os gases podem ser liquefeitos por compressão, por resfriamento ou pela combinação desses dois processos. (LELIS, 2013).

**Figura 4 – Navio gaseiro**



Fonte: Lelis (2013, p.28).

Ro-Ro é a sigla utilizada para definir os navios cargueiros *Roll on-Roll off*. É um segmento específico dentro do universo da navegação. Numa tradução livre, *Roll on-Roll off* significa rolar para dentro-rolar para fora. Uma definição mais acurada seria navio de “carga rolante”, ou seja, aquela que embarca e desembarca do navio rolando, seja em cima de suas próprias rodas (ou lagartas), seja em cima de um equipamento específico para isso. (SPRENGER, 2022).

Os navios *roll-on/roll-off*, projetados para o transporte de carga com rodas, sempre se distinguem por grandes portas no casco e, muitas vezes, por rampas externas que se dobram para permitir o rolamento entre o píer e o navio. (WOODWARD et al., 2020).

Estes navios são divididos em algumas classes, sendo elas *Pure Car Carrier* (PCC), que transporta apenas carros, *Pure Car Truck Carrier* (PCTC), que transporta carros e caminhões, *Container Ro/Ro* (ConRo), que transporta contêineres, *Ro/Ro Lo/Lo*, que pode transportar e carregar carga sobre rodas, mas que também tem

equipamento de elevação para carga e descarga através das escotilhas e Ro-Pax, que é um misto de carga com rodas e passageiros. (VENTURA, s.d.).

Diferentemente do navio transportador de contêiner, o navio Ro-Ro é todo fechado. É como se fosse um grande estacionamento vertical com várias rampas internas onde, na maioria das vezes, é possível ajustar a altura dos andares de acordo com o tipo de carga. Pode transportar veículos de passeio, caminhões, ônibus, tratores, vagões de trem, maquinário para agricultura e engenharia civil, aviões pequenos, helicópteros e carga de projeto, como, reatores, plataformas, guindastes, transformadores, turbinas, geradores e equipamentos de grande porte. (SPRENGER, 2022).

Uma das vantagens do Ro-Ro é sua versatilidade, pois pode carregar desde pessoas até maquinário pesado, ou até mesmo, os dois. Para o embarcador, a vantagem é a rapidez. Como os carros e caminhões podem seguir direto para o navio em um porto e depois sair no outro porto em poucos minutos após a atracação do navio, isso economiza muito tempo do remetente. (KANTHARIA, 2019).

**Figura 5 – Navio Ro-Ro**



Fonte: Rivierenlaan; Pixbay (2017).

Os navios de carga geral são os navios que transportam vários tipos de cargas, geralmente em pequenos lotes – sacarias, caixas, veículos encaixotados ou sobre rodas, bobinas de papel de imprensa, barricas, etc. Esses navios têm geralmente quatro ou cinco porões. São conhecidos por serem polivalentes. Usados no transporte de mercadorias diferentes. Alguns navios também podem ter espaços refrigerados para carga perecível. Normalmente é equipado com guindastes usados para carregar e descarregar o navio. (SPRENGER, 2022).

Os navios de carga geral são especificamente voltados para o transporte de cargas soltas de todos os tipos, mas não são adequados para o transporte de

contêineres. Uma das principais características desse tipo de embarcação é que ela possui um conjunto próprio de guindastes integrados à embarcação, que são utilizados para realizar o carregamento e descarregamento da carga no porto. (SUISCA GROUP, 2022).

**Figura 6 – Navio De carga geral**



Fonte: Wikimediaimages (2017).

Os navios porta-contêineres se tornaram a principal forma de transporte de produtos manufaturados em todo o mundo. Ou seja, um contêiner tem um tamanho padrão para simplificar o transporte e pode ser transferido entre caminhão, trem e navio com relativa facilidade. Em particular, os contêineres podem acomodar qualquer coisa, desde alimentos a equipamentos elétricos e automóveis. Os contêineres também são utilizados para o transporte de mercadorias ensacadas e paletizadas, líquidos e cargas refrigeradas. (SPRENGER, 2022).

Assim como os navios-tanque, os navios porta-contêineres são caracterizados pela ausência de equipamentos de manuseio de carga, em seu caso, utilizando os guindastes de movimentação de contêineres em terminais em terra e não a bordo do navio. (WOODWARD et al., 2020).

Ao contrário dos navios-tanque, os navios porta-contêineres exigem grandes escotilhas no convés para acondicionar a carga, que consiste em contêineres padronizados geralmente de 20 ou 40 pés de comprimento. Cada contêiner é então preso ao vaso e um ao outro para fornecer estabilidade. Depois que as primeiras camadas de contêineres são carregadas e as escotilhas fechadas, camadas extras são carregadas no topo. (SPRENGER, 2022).

Entre as desvantagens está o fato de que cada navio não transporta o volume total de carga com contêineres quanto na forma graneleira, pois os próprios contêineres ocupam espaço e, por serem quadrados, não preenchem todos os cantos

e fendas criadas por uma forma de casco em forma de navio. (WOODWARD et al., 2020).

**Figura 7 – Navio porta-contêineres**



Fonte: Dendoktoor; Pixbay (2021).

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DA PROPULSÃO DOS NAVIOS ATUALMENTE

Nas últimas décadas, o grande responsável por movimentar navios foi, e ainda é o motor de combustão interna operando no ciclo diesel, seja para gerar energia para um motor elétrico ou mesmo para fazer o deslocamento da embarcação. Nesta seção serão mostrados os meios de propulsão atuais e suas variantes.

### 2.2.1 Visão geral

O Motor de Combustão Interna está presente na maioria dos navios mercantes no cenário atual, que são responsáveis por nada menos que 95% do comércio internacional. Porém, a sua utilização vindo sendo cada dia mais criticada, devido a sua alta emissão de gases poluentes no meio ambiente. Em 2008 cerca de 4% de CO<sub>2</sub> que era lançado na atmosfera era proveniente de navios. (DIAS, 2014).

Atualmente, os navios de grande porte vêm tendo mudanças quanto ao combustível que usam, devido as legislações de poluentes. Anteriormente, operavam com um combustível que é um mix de derivados do petróleo, chamado de óleo combustível, ou *bunker oil*. É uma mistura de óleo diesel com óleos residuais pesados

da destilação do petróleo bruto, que emite óxidos de enxofre como subproduto da sua combustão no motor. (PETROBRAS, 2021).

Como evidenciado por Dias (2014), o interesse pelo aperfeiçoamento da operacionalidade, tecnologia e custo dos sistemas de propulsão vem crescendo a cada dia. É o caso da tecnologia *Common Rail*, propulsão eólica, dos biocombustíveis, da energia solar e do processo de torná-los híbridos. Passos estes que podem parecer pequenos, mas que estão na direção correta e que devem ser expostas.

## **2.2.2 Motores de combustão interna**

Os motores marítimos são motores térmicos, de combustão interna, utilizados para converter o calor gerado pela queima do combustível em trabalho útil, ou seja, converter energia térmica em energia mecânica. Motores de combustão interna funcionam em ciclos, destacando-se o Ciclo Diesel e o Ciclo Otto. (BRUNETTI, 2012).

Ciclo de operação, ou simplesmente ciclo, é a sequência de processos sofridos pelo FA, processos estes que se repetem periodicamente para a obtenção de trabalho útil. Quanto ao número de tempos, os motores alternativos, sejam do tipo MIF ou MIE, são divididos em dois grupos: motores alternativos de quatro tempos (4T) e motores alternativos de dois tempos (2T). (MARTINS, 2006).

### **2.2.2.1 Motores de 4 tempos**

De acordo com Brunetti (2012), neste caso, o pistão percorre quatro cursos, correspondendo a duas voltas do virabrequim do motor, para que seja completado um ciclo. Os tempos do motor são:

- 1º Tempo, admissão;
- 2º Tempo, compressão;
- 3ºTempo, expansão;
- 4ºTempo, escape.

### 2.2.2.2 Motores de 2 tempos

Como evidenciado por Martins (2006), nesses motores, o ciclo completa-se com apenas dois cursos do pistão, correspondendo a uma única volta do eixo do motor. Os processos indicados no motor a 4T são aqui realizados da mesma maneira, entretanto, alguns deles se sobrepõem num mesmo curso. Os tempos do motor são:

- 1º Tempo, admissão e compressão;
- 2º Tempo, expansão e escape.

### 2.2.3 Motores ciclo diesel

Chamados de MIE, que significa Motores de Ignição Espontânea, os motores diesel comprimem somente ar, através do pistão, até que o mesmo atinja uma temperatura suficientemente elevada. Quando o pistão se aproxima do PMS, aproximadamente 6º antes, injeta-se o combustível que reage espontaneamente com o oxigênio presente no ar quente, sem a necessidade de uma faísca. A temperatura do ar necessária para que aconteça a reação denomina-se TAI, ou seja, temperatura de autoignição. (BRUNETTI, 2012).

Os motores marítimos dos navios são responsáveis pela propulsão da embarcação de um porto a outro. Quer se trate de um pequeno navio navegando nas áreas costeiras ou de um enorme navegando em águas internacionais, um motor marítimo de 4 ou 2 tempos é instalado a bordo do navio para fins de propulsão. (KANTHARIA, 2019).

Não por serem chamados motores ciclo diesel que só podem ser abastecidos com este combustível. O nome vem de seu inventor, Rudolph Diesel, que no final do século XIX o desenvolveu, sendo o Óleo Vegetal de Amendoim seu primeiro combustível. O óleo diesel recebeu este nome por ter casado muito bem com a criação de Rudolph. Atualmente, o combustível utilizado é chamado de óleo combustível, ou *bunker oil*, que é uma mistura de óleo diesel com óleos residuais pesados da destilação do petróleo bruto. (PETROBRAS, 2021).

A maioria dos navios modernos usa um motor alternativo ciclo diesel como motor principal, devido à sua simplicidade operacional, robustez e economia de combustível, se comparado com a maioria dos outros mecanismos de propulsão principal. O virabrequim pode ser acoplado diretamente à hélice em motores de baixa

rotação, por meio de redutor para motores de média e alta rotação, ou por alternador e motor elétrico em embarcações diesel-elétricas. (INDUSTRIAL MARINE POWER, 2016).

A partir dos motores, os navios são classificados quanto a sua velocidade. Por exemplo, qualquer motor com velocidade operacional máxima de até 300 RPM, é considerado lento, embora a maioria dos grandes motores a diesel de baixa velocidade de dois tempos opere abaixo de 120 RPM. Alguns motores de curso muito longo têm uma velocidade máxima de cerca de 80 RPM. Os maiores e mais potentes motores do mundo são motores a diesel de baixa velocidade e dois tempos. (WILDON ENGINEERING AUSTRALIA, 2017).

Qualquer motor com velocidade máxima de operação na faixa de 300 a 1.000 RPM se enquadra como velocidade média. Muitos motores diesel de quatro tempos modernos de velocidade média, operam a cerca de 500 RPM. Qualquer motor com velocidade operacional máxima acima de 1000 RPM, é classificado como alta velocidade. (LEDUC, 2001).

Motores de 2 e 4 tempos estão amplamente disponíveis no mercado. Mesmo tendo ampla variedade de vantagens, como o tamanho compacto, maior RPM ou velocidade, entre outras, o motor de 4 tempos é ofuscado pelo de 2 tempos que tem poucas, mas vitais vantagens. Algumas das razões pelas quais os motores de 2 tempos são mais populares são a seleção de combustível, potência, capacidade de carga, confiabilidade e não necessitar de acessórios para que seja feita a redução. (WANKHEDE, 2021).

Nos últimos tempos, com a crescente demanda por petróleo, aliado aos reflexos da pandemia de Covid-19, os preços dos combustíveis subiram muito, fazendo com que os custos de operação da embarcação aumentem. Um motor de dois tempos pode queimar óleo combustível de baixa qualidade e, portanto, reduzir o custo operacional do navio, mas, para isso, o óleo diesel deve ser mantido quente e viscoso. Resumindo, motores 2T de grande porte requerem mais manutenção do que seu primo menor de alta velocidade. (WILDON ENGINEERING AUSTRALIA, 2017).

Em teoria, em uma comparação direta entre um motor 2T e um 4T de mesmo tamanho, o 2T deveria produzir o dobro da potência do de 4T. Porém, isso não ocorre pela deficiência da exaustão dos gases da queima. Os 2T têm alta relação potência/peso em comparação com motores de 4 tempos. O navio pode transportar mais peso e, portanto, mais carga com motores de 2 tempos devido à alta relação

potência/peso. Sendo assim, grandes embarcações utilizam, em sua maioria, motores de 2 tempos. (BRUNETTI, 2012).

Como os motores de dois tempos são motores de baixa velocidade, não há exigência de engrenagem de redução ou arranjo de redução de velocidade, como exigido para motores de quatro tempos, de alta velocidade. (BRUNETTI, 2012).

Porém, a facilidade de manobra de um motor de dois tempos é menor do que a de um motor de quatro tempos e o custo inicial de instalação de uma planta de propulsão de dois tempos também é maior do que o custo de operação e manutenção de um motor de 4 tempos. No motor de 2 tempos, a quantidade economizada em combustível de alta qualidade pode compensar todas as outras desvantagens e também reduzir todo o custo operacional. (WANKHEDE, 2021).

#### **2.2.4 Motores elétricos**

Um motor elétrico é um instrumento que converte energia. O motor elétrico é um tipo de dispositivo rotativo. Ele converte a forma elétrica da energia em mecânica. Funciona de acordo com o princípio do eletromagnetismo. Ele opera por causa da interação entre o campo magnético do motor. O campo magnético interage com a corrente elétrica nos fios do enrolamento. Essa interação produz força na forma de torque. Este torque é aplicado ao eixo do motor. (KUNAL, 2022).

É alimentado por corrente contínua ou corrente alternada. A construção dos motores de corrente contínua foi pensada para receber energia de uma fonte polarizada, ou seja, de um sistema onde a energia fornecida percorre um caminho entre entrada e saída. Essa corrente elétrica externa alimenta o rotor do motor pelo polo de entrada que conduz a eletricidade da fonte a um componente que chamamos de comutador, que por sua vez está conectado a uma armadura. (ABECOM, 2022).

No motor de corrente alternada um campo magnético é produzido por bobinas percorridas por correntes elétricas alternadas. Ou seja, há um rotor constituído por um ímã ou bobina que é alimentado pela corrente elétrica. Dessa forma, funciona a partir da variação cíclica da corrente elétrica em relação à intensidade e direção. (ABECOM, 2022).

Os motores elétricos são classificados com base em muitos fatores. Como o tipo de fonte de alimentação, aplicações, entre outros. Um motor elétrico funciona com base no princípio de que, quando uma corrente passa por uma bobina retangular

colocada em um campo magnético, uma força é aplicada à bobina. Essa força é responsável pela rotação contínua do motor. (KUNAL, 2022).

Um motor elétrico é composto, principalmente por um rotor, estator, rolamentos e enrolamentos. O rotor é uma parte móvel do motor, cuja função é girar o eixo do motor. Essa rotação no eixo produz energia mecânica, servindo também para transportar correntes. Também ajuda na comunicação com o campo magnético presente no estator. Os rolamentos são usados para fornecer suporte ao rotor. O estator é uma parte inativa do circuito eletromagnético. É composto por ímã permanente e enrolamentos, ajudando a reduzir a perda de energia. (ABECOM, 2022).

#### 2.2.4.1 Motores elétricos na indústria naval

A indústria naval vem percorrendo um longo caminho, afim reduzir os custos de propulsão sem aumentar a poluição marinha. O sistema de propulsão convencional dos navios, evidenciado no tópico anterior, é eficiente, mas requer altos custos operacionais e aumenta a poluição marinha. Diante das possíveis soluções que se tem como alternativa atualmente, a propulsão elétrica é uma das preferidas, sendo testada em larga escala. (LIMA, 2013).

O sistema de propulsão elétrica consiste em um motor principal que pode ser movido a diesel ou por uma turbina a vapor. O gerador de turbina é uma fonte popular de geração de energia limpa em navios, pois eles não usam nenhum tipo de combustível, como óleo pesado ou diesel. O vapor é uma forma fácil, ecológica e barata de combustível em navios. Para geradores de turbina, o vapor vem da caldeira de vapor do navio. (WANKHEDE, 2019).

Num sistema diesel-elétrico, por exemplo, que é o mais comum nestes casos, o eixo da hélice do navio é conectado a grandes motores elétricos, que podem ser acionados por corrente contínua ou alternada e são conhecidos como motores de propulsão. A energia para o motor de propulsão é fornecida pelo gerador do navio e pelo conjunto do motor principal. (LIMA, 2013).

No sistema de propulsão elétrica, a direção da rotação da hélice é governada pelo controle elétrico do próprio motor ou pela alteração da alimentação elétrica. Normalmente, o motor elétrico de velocidade variável é usado para sistema de hélice

de passo fixo e constante, podendo ser usado para hélice de passo variável. (WANKHEDE, 2019).

## 2.3 NECESSIDADE DE MUDANÇA COM BASE EM LEGISLAÇÕES

Buscando um mundo melhor, a cada ano que passa, vem surgindo novas regulamentações sobre os níveis de poluição, muitas delas sendo guiadas pela Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU). (ONU, 2015).

### 2.3.1 Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU)

(ONU, 2018; ONU, 2015). A proposta da Agenda 2030 é ser “um plano de ação para pessoas, para o planeta e para a prosperidade” (ONU, 2015), estimulando as ações dos países na busca pelo desenvolvimento sustentável. Dividida em 17 objetivos e 169 metas, busca construir sobre os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio e completar o que eles não alcançaram. Procura-se realizar os direitos humanos de todos e alcançar a igualdade de gênero. São integrados e indivisíveis e equilibram as três dimensões do desenvolvimento sustentável: a econômica, a social e a ambiental. (ONU, 2015).

No período de 15 anos (2015 a 2030), a Agenda visa atuar nas seguintes áreas:

- Pessoas: determinados a acabar com a pobreza e a fome;
- Prosperidade: determinados a garantir que todos os seres humanos possam desfrutar de uma vida próspera e plena e que o progresso econômico, social e tecnológico ocorra em harmonia com a natureza.
- Paz: determinados a promover sociedades pacíficas, justas e inclusivas, livres do medo e da violência.
- Planeta: determinados a proteger o planeta da degradação, inclusive por meio do consumo e da produção sustentáveis, gerindo de forma sustentável seus recursos naturais e tomando medidas urgentes sobre as mudanças climáticas, para que ele possa atender às necessidades das gerações presentes e futuras.

O Acordo de Paris definiu em 2015 a meta para assegurar que o aumento da temperatura média global fique abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais e prosseguir os esforços para limitar o aumento da temperatura a até 1,5°C acima dos

níveis pré-industriais, reconhecendo que isto vai reduzir significativamente os riscos e impactos das alterações climáticas. (UNFCCC, 2015).

### 2.3.2 IMO 2020

Conhecida popularmente como IMO 2020, a normativa expedida pela *Marine Environment Protection Committee* (MEPC), a partir da comissão da Organização Marítima Internacional (IMO), trata de questões ambientais envolvendo a navegação marítima, a qual define padrões de composição de combustível visando diminuir as emissões produzidas por navios. (STEINER; SILVEIRA; BUSS, 2021).

Redigida e considerada pelo conselho em 2016, afim de dar suporte a implementação da Agenda 2030 da ONU, a resolução MEPC.280(70) definiu a data de 01 de janeiro de 2020 como início da limitação em 0,5% m/m do teor máximo das emissões de óxido de enxofre (SOx) no combustível de navios, frente aos 3,5% m/m anteriormente praticados (IMO, 2016). Nocivo à saúde humana, o SOx causa sintomas respiratórios e doenças pulmonares. Na atmosfera, pode levar à chuva ácida, que não só prejudica as plantações, florestas e espécies aquáticas, mas também contribui para a acidificação marinha. (LI et al., 2020).

Os limites de emissão de óxidos de nitrogênio NOx são aplicados a todas as embarcações que realizem viagens internacionais e com motor diesel marítimo com potência de saída superior a 130 kW. A norma é aplicada em três categorias distintas, dependendo do ano de construção e da região de operação da embarcação.

Como evidenciado por YANG et al. (2012), para cumprir o limite de enxofre de 2020, os operadores de navios devem escolher entre três opções de redução: mudar para combustíveis com baixo teor de enxofre, instalar lavadores de SOx, operar com gás natural liquefeito (GNL) ou metanol. Segundo a IMO, essa nova regra reduzirá a emissão de enxofre em 77%, equivalente a uma redução anual de aproximadamente 8,5 milhões de toneladas de dióxido de enxofre. (IMO, 2016).

No Brasil, a ANP aplicou a regra da IMO 2020 em maio de 2019, através da Resolução ANP nº 789/19. Essa norma determina a redução do limite máximo do teor de enxofre dos óleos combustíveis marítimos para as embarcações que não dispuserem de sistema de limpeza de gases de escape. (BRASIL, 2019).

### **2.3.3 EEDI - Índice de Projeto de Eficiência Energética**

A EEDI para navios novos é a medida técnica mais importante e visa promover o uso de equipamentos e motores com maior eficiência energética (menos poluentes). O EEDI exige um nível mínimo de eficiência energética por milha de capacidade (por exemplo, milha-tonelada) para diferentes segmentos de tipo e tamanho de navio. (IMO, 2020).

Desde 1º de janeiro de 2013, após uma fase zero inicial de dois anos, o novo projeto de navio precisa atender ao nível de referência para seu tipo de navio. O nível deve ser aumentado gradualmente a cada cinco anos e, portanto, espera-se que o EEDI estimule a inovação contínua e o desenvolvimento técnico de todos os componentes que influenciam a eficiência de combustível de um navio desde a fase de projeto. (IMO, 2020).

O EEDI é um mecanismo não prescritivo baseado em desempenho que deixa a escolha das tecnologias a serem usadas em um projeto de navio específico para a indústria. Desde que o nível de eficiência energética exigido seja atingido, os projetistas e construtores de navios são livres para usar as soluções mais econômicas para que o navio cumpra os regulamentos. O EEDI fornece um valor específico para um projeto de navio individual, expresso em gramas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) por milha de capacidade do navio (quanto menor o EEDI, maior a eficiência energética do projeto do navio) e é calculado por uma fórmula baseada nos parâmetros do projeto técnico de um determinado navio. (IMO, 2020).

### **2.3.4 EEXI - Índice de Eficiência Energética de Navios Existentes**

As alterações ao Anexo VI da Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL), adotadas em junho de 2021 pela 76ª reunião do Comitê de Proteção Ambiental Marítimo (MEPC), apresentam desafios significativos à indústria naval. (HARRIS, 2021).

A partir de primeiro de janeiro de 2023, as embarcações registradas nos países subscritos da MARPOL terão suas emissões testadas, podendo ser na próxima inspeção anual ou posteriormente, na vistoria de renovação da embarcação, usando uma escala conhecida como Índice de Eficiência Energética de Navios Existentes (EEXI). Os testes ocorrerão em todos os navios de 400 toneladas de arqueação bruta

(GT) ou mais. Desde 2013, as embarcações em construção são submetidas a testes em regime semelhante - o Índice de Projeto de Emissões de Energia (EEDI). (HARRIS, 2021).

Foi instituído que o objetivo dessas mudanças são:

Conduzir a indústria naval em direção à meta da Organização Marítima Internacional (IMO) de uma redução de 40% nas emissões de carbono - em comparação com os níveis de 2008 - até 2030. Podem ser necessárias mais ações, uma vez que a União Europeia (UE) declarou recentemente que, para todos os navios que visitam portos ou navegam em suas águas, uma redução maior de 55% nas emissões de carbono, em comparação com os níveis de 1990, será necessária até 2030. (HARRIS, 2021, n.p).

Simplificado, o EEXI estima as emissões de CO<sub>2</sub> por trabalho de transporte (gramas de CO<sub>2</sub> por tonelada-milha). Outras soluções para adequação ao EEXI incluem a adaptação de tecnologias limpas, como baterias, sistemas de recuperação de calor residual, tecnologia de lubrificação a ar, propulsão assistida pelo vento ou o uso de combustíveis de baixo ou zero carbono. O impacto dessas soluções na melhoria da eficiência energética pode não ser suficiente por si só para atender a EEXI. (METTÄLÄ, 2021).

### **2.3.5 CII – Indicador de Intensidade de Carbono**

O CII (Indicador de Intensidade de Carbono) mede a eficiência com que uma embarcação acima de 5.000 GT transporta mercadorias ou passageiros e é dado em gramas de CO<sub>2</sub> emitido por capacidade de transporte de carga e milha náutica. O primeiro relatório do CII com base em dados de 2023 deve ser entregue até 31 de março de 2024. (DNV, 2021).

As embarcações receberão uma classificação de:

- A (maior superior);
- B (menor superior);
- C (moderado);
- D (menor inferior);

- E (nível de desempenho inferior).

Os limites de classificação se tornarão cada vez mais rigorosos em 2030. Uma embarcação classificada como D por três anos consecutivos ou classificada como E precisará desenvolver um plano de ações corretivas. (DNV, 2021).

### 2.3.5.1 Cálculo do CII

A unidade CII é “gramas de CO2 emitidos por capacidade de transporte de carga e milha náutica”, em que a capacidade de carga é o porte bruto ou toneladas brutas, dependendo do tipo de navio. Além disso, para atender a projetos especiais e circunstâncias operacionais, os fatores de correção e ajustes de viagem podem ser aplicados aos cálculos básicos do CII para fins de determinação da classificação. (DNV, 2021).

Figura 8 – Cálculo do CII



Fonte: DNV (2021).

## 2.4 ATUAIS MANEIRAS ESTAR EM CONFORMIDADE COM AS LEGISLAÇÕES

Para cumprir com o limite de enxofre imposto pela IMO, os armadores de navios possuem três alternativas de curto e médio prazo para redução. (LI et al., 2020).

- Realizar a transição para combustíveis de baixo teor de enxofre, como o *Marine Gas Oil* (MGO) e óleo combustível com baixo teor de enxofre, do inglês *Low Sulfur Fuel Oil* (LSFO). (STEINER; SILVEIRA; BUSS, 2021).
- Instalar sistema de tratamento de gases (*scrubbers*) para controle dos poluentes expelidos pelos navios, permitindo, assim, a utilização de óleo combustível com alto teor de enxofre, o *High Sulfur Fuel Oil* (HSFO). (STEINER; SILVEIRA; BUSS, 2021).
- Adquirir embarcações movidas a Gás Natural Liquefeito (GNL) (SOUSA et al., 2020).

Dentre as alternativas elencadas, a mais atrativa economicamente é a primeira, pois evita um grande investimento de capital em remodelação de embarcações, havendo apenas a necessidade de pequenas modificações em tanques e motores (ZHU et al., 2020; LI et al., 2020).

A segunda alternativa também é atraente, portando-se como a principal escolha em 15-20% das embarcações, porém, observou-se no ano de 2021, que a solução foi adotada por aproximadamente 5% das embarcações. Tem como principais desvantagens os elevados custos de investimento, a perda de área de armazenamento no navio para instalação da estrutura necessária e o fato de a tecnologia ainda ser recente e não comprovada, o que afeta sua confiabilidade. (STEINER; SILVEIRA; BUSS, 2021).

A terceira solução é a menos empregada por ser altamente custosa e exigir alterações tanto nas embarcações quanto nos portos (ÁLVAREZ, 2021).

## 2.5 DEFICIÊNCIA TECNOLÓGICA

Atualmente, mesmo os navios que utilizam motores elétricos, necessitam de uma fonte geradora de energia para que estes possam ser abastecidos. Na grande maioria dos casos, o gerador é alimentado por um motor de combustão interna no ciclo diesel. Muito se fala na utilização de energias limpas, carbono zero, dentre outras do tipo. Porém, ainda são coisas complicadas de se colocar em prática neste setor, dada a magnitude das embarcações e de suas cargas. (WANKHEDE, 2019).

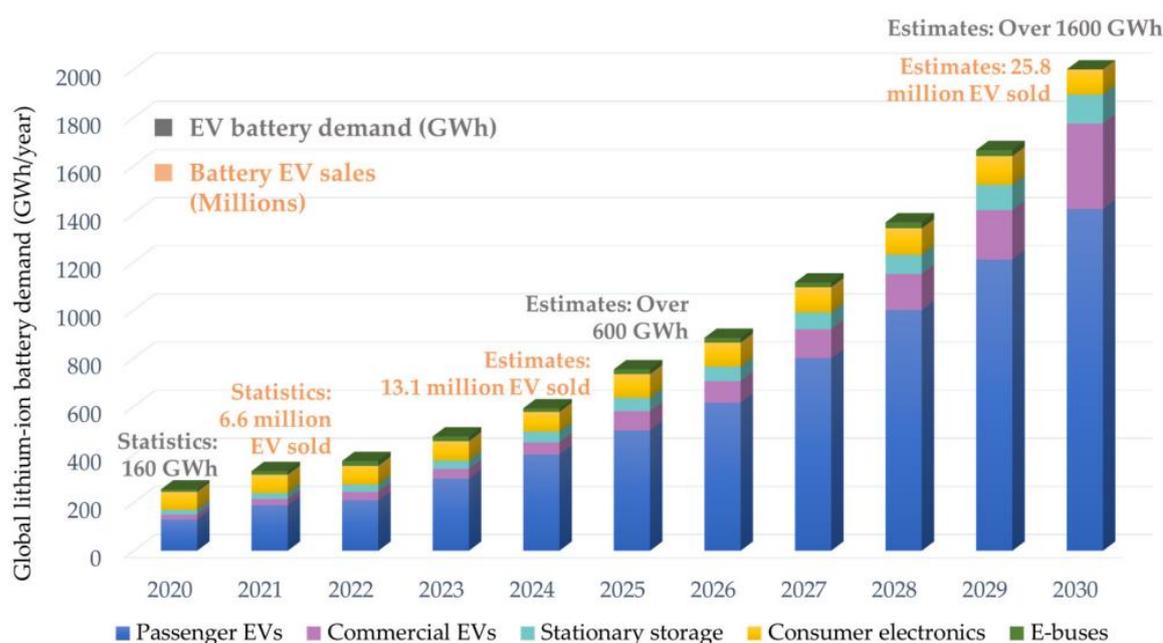
### 2.5.1 Baterias

As vendas globais de veículos elétricos (EVs) tiveram grande crescimento nos últimos tempos, atingindo um novo recorde de 6,6 milhões em 2021. O avanço da tecnologia de armazenamento de energia da bateria de íon-lítio desempenha um papel fundamental no marketing de massa de veículos elétricos. As estimativas mostraram que a demanda global por baterias de íons de lítio aumentaria mais de cinco vezes, para 2.000 gigawatts-hora (GWh) entre 2022 e 2030. (ZHAO; BURKE, 2022).

Entretanto, as baterias automotivas encontram ambientes operacionais complexos e hostis durante a operação diária dos veículos elétricos. A confiabilidade,

longevidade e segurança da bateria podem ser comprometidas em condições realistas. Portanto, prognósticos de bateria em tempo integral e gerenciamento de integridade (PHM) podem desempenhar um papel importante no aumento da vida útil e da segurança da bateria. Apesar do progresso implacável, as informações para os proprietários de veículos ainda são muito limitadas devido às dificuldades em prever com precisão a evolução dos sistemas de baterias multifísicas não lineares. (ZHAO; BURKE, 2022).

**Figura 9 – Demanda e utilizações das baterias**



Fonte: Zhao; Burke; Batteries (2022).

### 2.5.1.1 Autonomia de veículos elétricos

Os fabricantes europeus e norte-americanos de ônibus elétricos e caminhões dependem fortemente dos fabricantes asiáticos de baterias. Dada a sua predominância na química de baterias de fosfato de ferro e lítio (LFP), a CATL da China produz a grande maioria das baterias para caminhões. No entanto, estimulados por políticas industriais, os fabricantes de caminhões já começaram a construir ou anunciaram investimentos em novas instalações de produção de baterias pesadas. (IEA ORGANIZATION, 2023).

Mais de 95% dos caminhões pesados produzidos na China foram equipados com químicas de cátodo LFP em 2021. A durabilidade e o custo mais baixo das baterias LFP as tornam a escolha preferida não apenas devido à alta quilometragem

necessária para operações comerciais, mas também porque o preço é uma preocupação para os compradores. A capacidade da bateria dos modelos comerciais e anunciados atualmente disponíveis incluídos no banco de dados ZETI dentro de um determinado tipo de veículo geralmente se correlaciona com a autonomia declarada do veículo. (IEA ORGANIZATION, 2023).

**Figura 10 – Evolução da capacidade média das baterias**

Categoria do veículo	Capacidade média da bateria (kWh)				
	2019	2020	2021	2022	Mudança 2019-2022
Ônibus urbano	264	322	225	345	31%
Ônibus escolar	155	141	207	137	-12%
Ônibus rodoviário	316	347	233	266	-16%
Van de carga	69	90	57	60	-13%
Van de porte médio	--	134	155	163	22%
Caminhão médio	124	139	99	92	-26%
Caminhão pesado	293	232	372	311	6%
Trator de quintal	150	184	160	197	31%

Fonte: IEA Organization; Trends in electric heavy-duty vehicles (2023).

Por exemplo, o requisito de kWh por km para caminhões pesados e ônibus é de cerca de 1,1-1,3 kWh/Km, dependendo do tipo de veículo, e para serviço médio 1,0 kWh/Km ou menos. Em comparação com 0,2 kWh/km e menos para carros de passeio e veículos leves. (PANAYI, 2019).

Para serviço pesado, isso equivale a um tamanho de bateria de cerca de 800-1.000 kWh para fornecer 800 km de alcance. Mesmo com preços de bateria próximos a US\$ 100 por kWh, isso representa um custo enorme para o veículo. Igualmente importantes são as considerações de peso e espaço, nas densidades de energia atuais, o peso da bateria para atingir essa faixa seria da ordem de 5.000 a 6.000 kg, equivalente a uma perda de carga útil de 5 a 10%, dependendo do caminhão, em comparação com o diesel. Além disso, os tempos de carregamento seriam da ordem de várias horas usando a atual tecnologia de carregamento rápido. (PANAYI, 2019).

### 2.5.1.2 Deficiência apresentada por baterias

As baterias não se degradam na mesma proporção a cada ano. Baterias geralmente apresentam a queda mais rápida no início e no final de sua vida útil, criando uma curva em 'S'. As baterias são sistemas químicos que utilizam um material ativo, que neste caso é o lítio, para gerar energia. As formas físicas pelas quais as baterias podem se degradar podem ser divididas em duas categorias principais, sendo elas perda de capacidade e perda de carga. (WITT, 2021).

Ambos afetarão seu alcance, mas de maneiras diferentes. A perda de capacidade é predominantemente devido à menor disponibilidade de lítio para reações químicas, o que significa que há literalmente menos energia disponível na bateria. Isso acontece quando reações químicas secundárias consomem parte do lítio disponível, como quando você carrega frequentemente em temperaturas frias. Também pode haver corrosão na bateria que cria uma barreira física, impedindo o fluxo livre de lítio. Isso também pode levar perda de capacidade. (NAJMAN, 2021).

Tanto a perda da carga quanto a perda da capacidade podem ser temporários ou permanentes, e ambos acontecerão inevitavelmente com o uso normal. Temperaturas extremas, carregamento rápido e armazenamento da bateria em altos estados de carga podem acelerar a quantidade de lítio adicionada à camada protetora, o que pode causar perda de capacidade e perda de energia. (WITT, 2021).

### 2.5.2 Custo das baterias marítimas

As baterias têm uma ampla faixa de preço, dependendo da aplicação e da composição química. Enquanto NCM e LFP normalmente estão na faixa de 500 a 1.000 USD/kWh, o LTO normalmente é o dobro disso. Além disso, vem a eletrônica de potência e os esforços relacionados à engenharia e instalação. (DNV, 2020).

Um mal-entendido comum sobre os custos da bateria é que as pessoas leem as notícias sobre carros elétricos e o custo da bateria cai para 100-200 USD/kWh. É importante entender que geralmente estão falando sobre a célula de bateria, ou talvez um módulo, para um sistema produzido em massa para carros. Os navios exigem sistemas mais personalizados com requisitos mais elevados para a bateria, principalmente no que diz respeito à segurança. A “marinização” do sistema significa

que os sistemas de baterias marítimas se tornam significativamente mais caros do que as baterias de automóveis. (DNV, 2020).

## 2.6 TENDÊNCIAS PARA O FUTURO

Além das tecnologias mencionadas previamente, outras alternativas inovadoras a longo prazo para redução de emissões estão sendo desenvolvidas, como as células de combustível de hidrogênio. Estão sendo desenvolvidos navios movidos a hidrogênio líquido, o qual deve ser o *Energy Observer 2* o primeiro movido a este tipo de combustível. Tem previsão de lançamento para 2022 e deverá operar no Rio Sena. (GOHARY; SEDDIEK, 2013).

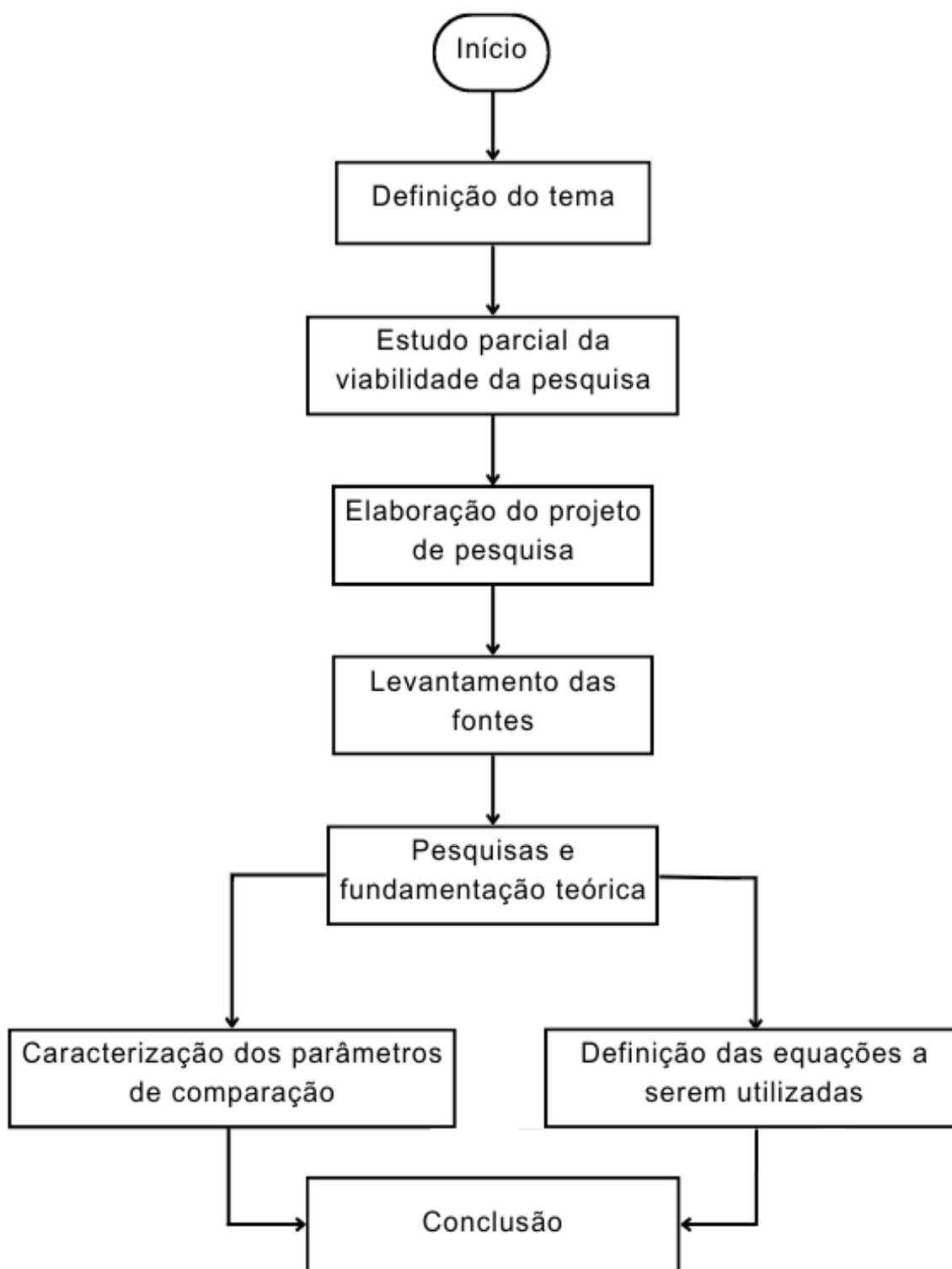
Ademais, a navegação por meio de energia solar também pode ser uma solução factível. Portanto, a energia solar para sistemas de propulsão elétrica tem uma série de vantagens, incluindo redução no consumo de combustível de um navio e nas emissões de poluentes. Além disso, a tecnologia solar fotovoltaica (PV) está se tornando cada vez mais desenvolvida e, portanto, a energia solar tem amplas perspectivas de aplicação para navios em um futuro próximo (YANG et al., 2020; TANG, 2017).

O projeto *E-ferry* é um projeto de desenvolvimento apoiado pela UE com o objetivo de projetar, construir e demonstrar uma balsa de passageiros e carros 100% elétrica. O *E-ferry Ellen* é, em muitos aspectos, um pioneiro em seu campo, o que é especialmente evidente por seu alcance. Ela pode navegar até 22 milhas náuticas entre cargas, o que é 7 vezes mais longe do que anteriormente possível para uma balsa elétrica. (DNV, 2020).

Atualmente, alguns países desenvolvidos estão difundindo tecnologias relacionadas ao projeto e fabricação de navios solares. Uma questão-chave ao projetar um navio híbrido solar-diesel é como otimizar a potência dos coletores solares e geradores a diesel para atender às necessidades de toda a carga elétrica do navio, de modo que a eficiência econômica de seu combustível seja ótima e o gerador também permanece altamente eficiente. (YANG et al., 2020).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Figura 11 – Fluxograma de como a pesquisa foi estruturada



Fonte: Autor.

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

O objetivo fundamental da ciência é conferir autenticidade a fatos. Portanto, deve-se escolher o método científico para definir as diretrizes e técnicas a serem desenvolvidas no trabalho de pesquisa, com o objetivo de dar confiabilidade aos resultados obtidos.

Quanto aos procedimentos metodológicos, a presente pesquisa pode ser classificada como um estudo de caso, tendo caráter exploratório, de natureza qualitativa não conclusiva. Portanto, foram realizadas revisões de literatura em bibliografias brasileiras e estrangeiras, desde artigos científicos a legislações, afim de fundamenta-la teoricamente. (YIN, 2001).

Esta pesquisa fica delimitada ao estudo da viabilidade de operação dos motores ciclo diesel em serviços extrapesados diante da atual deficiência tecnológica e de um mundo cada vez mais preocupado com os níveis de emissão de poluentes e qualidade de vida. Esta pesquisa é compreendida no período de 10 meses, entre agosto de 2022 e junho de 2023.

### 3.2 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DA COLETA DE DADOS

Utilizando o buscador Google Scholar, livros seminais, legislações vigentes, legislações futuras e catálogos de fabricantes, foram selecionados artigos e dados condizentes com o tema proposto nesta pesquisa. Para a seleção dos dados a serem validados, foi utilizada a observação e uma análise cruzada das informações obtidas.

#### 3.2.1 Definição operacional das variáveis

Partindo do princípio que este trabalho de conclusão consiste em uma estudo e caso qualitativo, temos que as variáveis são: os níveis de emissões de poluentes, as legislações vigentes e a eficiência dos navios perante sua capacidade.

##### 3.2.1.1 Definição de extrapesado

Variável medida com base, neste caso, no porte bruto da embarcação, também conhecido como *Deadweight*. Consiste na medida utilizada para definir a diferença

entre o peso total da carga suportada por uma embarcação e o peso necessário para que ele funcione como esperado, não sendo apenas a carga paga, mas todo e qualquer item transportado a bordo. Nisso, incluem-se combustíveis, lubrificantes, águas potáveis, tripulação com seus pertences, peças sobressalentes e removíveis, entre outros. Portanto, define-se como extrapesado qualquer navio acima de 23.999 DWT.

### 3.2.1.2 EEXI - Índice de Eficiência Energética de Navios Existentes

Os testes ocorrem em todos os navios de 400 unidades de arqueação bruta, também chamado de *Gross Tonnage* (GT) ou mais. A maneira mais fácil de reduzir o índice de eficiência energética é reduzir a potência do motor, pois o consumo de combustível e as emissões das embarcações, respectivamente, aumentam à medida que a velocidade aumenta. Portanto, as emissões de CO<sub>2</sub> são aproximadamente proporcionais ao cubo da velocidade do motor (rpm). Isso significa que reduzir a velocidade em 20% pode reduzir o CO<sub>2</sub> emitido em 50%.

Como existem operações em que a embarcação acaba ficando um certo tempo fundeada aguardando uma janela para carga ou descarga, não precisa necessariamente trabalhar em sua velocidade máxima de projeto. Partindo do princípio que as emissões de CO<sub>2</sub> são aproximadamente proporcionais ao cubo da velocidade, essa pode ser uma saída para redução dos gases liberados. Entretanto, operar o motor com alta carga e baixa rotação, pode vir a causar um desgaste prematuro e uma falha catastrófica.

**Figura 12 – Cálculo do EEXI**

$$EEXI = \frac{CO_2 \text{ emissions}}{Transportation \text{ work}}$$

$$EEXI = \frac{\text{Main engine emissions} + \text{Auxiliary engine emissions} + (PTI - \text{Innovative electrical energy technologies}) - \text{Innovative propulsion energy technologies}}{\text{Capacity} * \text{Reference speed} * \text{Reduction factors}}$$

$$EEXI = \frac{(\prod_{j=1}^n f_j) (\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)} C_{ME(i)} SFC_{ME(i)}) + (P_{AE} C_{AE} SFC_{AE}) + \left( (\prod_{j=1}^n f_j \sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)} - \sum_{a=1}^{n_{eff}} f_{eff(a)} P_{AE_{eff(a)}}) C_{FAE} SFC_{AE} \right) - (\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} P_{eff(i)} C_{FME} SFC_{ME})}{\text{Capacity} V_{ref} f_i f_c f_l f_w f_m}$$

Fonte: Mettälä (2021).

Simplificado, o EEXI estima as emissões de CO<sub>2</sub> por trabalho de transporte (gramas de CO<sub>2</sub> por tonelada-milha), embora a equação seja mais complexa, levando

em conta possíveis fatores de redução, equipamentos economizadores de energia, etc.

Os fatores para alterar o EEXI são então:

- Redução de energia pelo EPL (*Engine Power Limiter*);
- Retirar/reduzir o Carbono do combustível (retirar/reduzir o Cf);
- Aumentar o *deadweight* (DWT), precisa de uma mudança de projeto, possível até certo ponto para algumas embarcações;
- Aumente a velocidade de referência (Vref).

Se olharmos especificamente para o Vref, para uma embarcação EEDI, o Vref é encontrado pelo teste de mar quando a embarcação é nova. O teste de mar é testemunhado por classe e é feito sob condições padrão acordadas.

Para embarcações que não possuem EEDI, pode ter havido novas condições de teste de mar de construção diferentes, pode haver métodos diferentes em estaleiros diferentes e, talvez, as informações relevantes não existam. Portanto, pode ser difícil encontrar o Vref “certo” para uma embarcação ao calculá-lo para o EEXI.

Foi então sugerido um método, onde um cálculo baseado em parâmetros estatísticos de vários bancos de dados + o MCR do motor da embarcação leva a um Vref,app, que então será usado para calcular o EEXI da embarcação. Infelizmente o Vref,app quase sempre acaba sendo um pouco menor do que o Vref das embarcações, se for calculado usando as informações de teste de mar disponíveis. Portanto, um Vref menor fornecerá um EEXI maior e, portanto, uma redução de potência maior necessária para atender às regras.

### 3.2.1.3 Níveis de emissão de poluentes (SOx)

A partir de 2020, foi implementada uma limitação em 0,5% m/m do teor máximo das emissões de óxido de enxofre (SOx) no combustível de navios, frente aos 3,5% m/m praticado anteriormente.

- 4,50% m/m antes de 1º de janeiro de 2012;
- 3,50% m/m em 1º de janeiro de 2012 ou depois; e
- 0,50% m/m em 1º de janeiro de 2020 ou depois.

Portanto, temos o nível de emissões como uma variável, com limite de 0,5% m/m.

#### 3.2.1.4 Níveis de emissão de poluentes (NOx)

A partir de 2011, foi implementada a MARPOL 73/78, uma limitação para a emissão de óxido de nitrogênio para embarcações com potência superior a 130 kW, a qual varia de acordo com o ano de fabricação e com as rotações empregadas pelos motores.

A primeira categoria abrange embarcações construídas de 1º de janeiro de 2001 até 1º de janeiro de 2011, dos motores que estiverem dentro dos seguintes limites, onde  $n$  = velocidade nominal do motor (rotações do eixo de manivelas por minuto):

- 17,0 g/kWh, quando  $n$  for mais de 130 rpm;
- $45 n^{(-0,2)}$  g/kWh, quando  $n$  for 130 ou mais, mas menos que 2.000 rpm;
- 9,8 g/kWh, quando  $n$  for 2.000 rpm ou mais.

A segunda categoria abrange embarcações construídas a partir de 2011, operando em qualquer região que não possua controle de emissão de NOx. Essa norma também depende da rotação dos motores:

- 14,4 g/kWh, quando  $n$  for menos de 130 rpm;
- $44 n^{(-0,2)}$  g/kWh, quando  $n$  for 130 ou mais, mas menos de 2.000 rpm;
- 7,7 g/kWh, quando  $n$  for 2.000 rpm ou mais.

Por fim, a terceira categoria abrange apenas embarcações construídas a partir de 1º de janeiro de 2016, operando em áreas de controle de NOx. Essas normas são muito mais rigorosas do que as das categorias anteriores e até então é a última resolução do tipo, com limites de:

- 3,4 g/kWh, quando  $n$  for menos de 130 rpm;
- $9 n^{(-0,2)}$  g/kWh, quando  $n$  for 130 ou mais, mas menos de 2.000 rpm;
- 2,0 g/kWh, quando  $n$  for 2.000 rpm ou mais.

## 4 VALIDAÇÃO DA PESQUISA

### 4.1 CASO EXEMPLO – NAVIO GRANELEIRO

Para uma melhor compreensão do que fora apresentado até aqui, serão efetuados cálculos baseados em um navio graneleiro *Suezmax*.

### 4.2 CARACTERÍSTICAS DO NAVIO

As características do navio são baseadas no *Sample of EEXI Technical File*, da MEPC 76-15. (IMO, 2021).

**Figura 13 – Informações gerais**

Operadora do navio	XXX Shipping Line
Fabricante do navio	XXX Shipbuilding Company
Casco nº	13579
Registro IMO	98113XX
Tipo de navio	Graneleiro
Classe do navio	Suezmax

**Figura 14 – Principais detalhes**

Comprimento total	255 m
Largura moldada	40 m
Profundidade moldada	22 m
Calado da linha de carga de verão, moldado	15 m
Deadweight no calado de carga da linha de verão	160.000 toneladas

**Figura 15 – Motor principal**

Fabricante	XXX Engines
------------	-------------

Tipo	XXX
Potência total do motor ( $P_{ME}$ )	8.250 kW
Potência contínua máxima ( $MCR_{ME}$ )	14.900 kW x 80 rpm
Potência contínua máxima limitada por EPL ( $MCR_{ME, lim}$ )	9.910 kW x 70 rpm
SFC total	198,79 g/kWh
SFC a 75% do $MCR_{ME}$ ou 83% do $MCR_{ME, lim}$	165,5 g/kWh
Número de conjuntos	1
Tipo de combustível	Óleo diesel

\*Fator de conversão de  $CO_2$  ( $C_F$ ) corresponde ao combustível usado ao determinar o SFC.  $C_F = 3.206$ .

**Figura 16 – Motor auxiliar**

Fabricante	XXX Engine Industries
Tipo	XXX
Potência total do motor ( $P_{AE}$ )	625 kW
Potência contínua máxima ( $MCR_{AE}$ )	600 kW x 900 rpm
$SFC_{AE}$	220 g/kWh
SFC a 50% do $MCR_{AE}$	165,8 g/kWh
Número de conjuntos	3
Tipo de combustível	Óleo diesel

**Figura 17 – Velocidade do navio**

Velocidade do navio ( $V_{ref}$ ) com EPL instalado	14,10 nós
---	-----------

### 4.3 EQUACIONAMENTO DO EXEMPLO

Serão equacionadas as situações da embarcação sem redução de potência e com redução.

#### 4.3.1 Cálculo do navio com potência máxima

$$EEI = \frac{CO_2 \text{ emissions}}{\text{Transportation work}}$$

$$EEI = \frac{\text{Main engine emissions} + \text{Auxiliary engine emissions} + (\text{PTI} - \text{Innovative electrical energy technologies}) - \text{Innovative propulsion energy technologies}}{\text{Capacity} * \text{Reference speed} * \text{Reduction factors}}$$

$$EEI = \frac{\text{Power} * \text{SFOC} * \text{Cf}}{\text{DWT} * \text{Vref}}$$

$$EEI_{Total} = \frac{(14.900 + 600) \times (198,79 + 220) \times (3,206)}{160.000 \times 14,10}$$

$$EEI_{Total} = 9,225 \text{ g} - \frac{CO_2}{\text{tonelada} \cdot \text{milha}}$$

#### 4.3.2 Cálculo do navio com potência reduzida

$$EEI = \frac{CO_2 \text{ emissions}}{\text{Transportation work}}$$

$$EEI = \frac{\text{Main engine emissions} + \text{Auxiliary engine emissions} + (\text{PTI} - \text{Innovative electrical energy technologies}) - \text{Innovative propulsion energy technologies}}{\text{Capacity} * \text{Reference speed} * \text{Reduction factors}}$$

$$EEI = \frac{\text{Power} * \text{SFOC} * \text{Cf}}{\text{DWT} * \text{Vref}}$$

$$EEI_{Reduzido} = \frac{(9.910 + 600) \times (165,5 + 165,8) \times (3,206)}{160.000 \times 14,10}$$

$$EEI_{Reduzido} = 4,95 \text{ g} - \frac{CO_2}{\text{tonelada} \cdot \text{milha}}$$

### 4.3.3 Redução total

$$CO_{2N\tilde{a}oLiberado} = EEXI_{Total} - EEXI_{Reduzido}$$

$$CO_{2N\tilde{a}oLiberado} = [ 9,225 - 4,95 ] g - \frac{CO_2}{tonelada \cdot milha}$$

$$CO_{2N\tilde{a}oLiberado} = 4,275 g - \frac{CO_2}{tonelada \cdot milha}$$

## 4.4 CÁLCULO DO TEMPO DE VIAGEM

Como as emissões de CO<sub>2</sub> são aproximadamente proporcionais ao cubo da velocidade, e reduzir a velocidade em 20% pode reduzir o CO<sub>2</sub> emitido em 50% e uma redução de 10% na velocidade de cruzeiro reduz o uso de combustível por hora em quase 30%, será calculado o tempo de viagem do navio nos parâmetros normais e com sua velocidade reduzida, a fim de comparação. O EPL pode reduzir o uso de combustível e as emissões de CO<sub>2</sub> se reduzir as velocidades operacionais, pois quanto menor a rpm do motor, menores as emissões. Entretanto, operar o motor com alta carga e baixa rotação, pode vir a causar um desgaste prematuro e uma falha catastrófica.

**Figura 18 – Dados para o cálculo**

Porto de origem	Paranaguá, Paraná, Brasil
Porto de destino	Roterdã, Holanda, Países Baixos
Distância	6.951 milhas náuticas

### 4.4.1 Tempo de viagem sem redução de velocidade

$$Tempo\ de\ viagem_{sr} = \frac{Dist\ancia}{Velocidade} = \frac{x\ Horas}{24\ Horas} = n\ Dias$$

$$\text{Tempo de viagem}_{sr} = \frac{6.951 \text{ nm}}{14,10 \text{ nós}} = \frac{492,98 \text{ Horas}}{24 \text{ Horas}} = 20,54 \text{ dias}$$

$$\text{Tempo de viagem}_{sr} \cong 20 \text{ dias e } 13 \text{ horas}$$

#### 4.4.2 Tempo de viagem com redução de velocidade

Agora a velocidade de cruzeiro do navio será reduzida em 20%:

$$\text{Velocidade}_{reduzida} = V_{ref} \times 0,8$$

$$\text{Velocidade}_{reduzida} = 14,10 \text{ nós} \times 0,8$$

$$\text{Velocidade}_{reduzida} = 11,28 \text{ nós}$$

Já com a velocidade calculada, temos:

$$\text{Tempo de viagem}_{cr} = \frac{\text{Distância}}{\text{Velocidade}} = \frac{x \text{ Horas}}{24 \text{ Horas}} = n \text{ Dias}$$

$$\text{Tempo de viagem}_{cr} = \frac{6.951 \text{ nm}}{11,28 \text{ nós}} = \frac{616,22 \text{ Horas}}{24 \text{ Horas}} = 25,67 \text{ dias}$$

$$\text{Tempo de viagem}_{sr} \cong 25 \text{ dias e } 16 \text{ horas}$$

#### 4.5 SUPOSIÇÃO DO ALCANCE DE BATERIAS

Por exemplo, o requisito de kWh por km para caminhões pesados e ônibus varia de 1,1 à 1,3 kWh/Km, dependendo do tipo de veículo, e para serviço médio 1,0 kWh/Km ou menos. Em comparação com 0,2 kWh/km e menos para carros de passeio e veículos leves.

O *E-Ferry Ellen* tem alcance de 22 milha náuticas, utilizando uma bateria de 4300 kWh, algo em torno de 195,45 kWh/milha náutica.

Como estes números não existem para grandes embarcações, será feita uma suposição matemática, a qual utilizará os valores do *E-Ferry*, por serem os mais

próximos da realidade, no que seria necessário para uma bateria atender viagens transatlânticas.

#### 4.5.1 Cálculo da suposição

Consideremos a mesma viagem apresentada anteriormente na figura 18, partindo de Paranaguá e com destino a Roterdã, temos:

$$1 \text{ km} \cong 0,54 \text{ milhas náuticas}$$

Requisito de bateria por milha náutica  $\cong 195,45 \text{ kWh/milha náutica}$

$$\text{Capacidade necessária} = \frac{\text{Requisito de bateria em kWh}}{\text{milha náutica}} \times n \text{ milhas náuticas}$$

$$\text{Capacidade necessária} = 195,45 \frac{\text{kWh}}{\text{milha náutica}} \times 6.951 \text{ milhas náuticas}$$

$$\text{Capacidade necessária} = 1.358.572,95 \text{ kWh}$$

$$\text{Capacidade necessária} \cong 1,358 \text{ GWh}$$

Por exemplo, baterias de 6 a 12 quilowatts-hora (kWh) normalmente pesam entre 100 e 150 kg, enquanto baterias de 60 a 100 kWh variam de 350 a 600 kg.

Para o cálculo de peso da bateria, utilizaremos o valor médio de 6,25 kg/kWh.

$$\text{Peso médio da bateria} = 1.358.572,95 \text{ kWh} \times 6,25 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Peso médio da bateria} = 8.491.080,9375 \text{ kg}$$

$$\text{Peso médio da bateria} \cong 8.491 \text{ toneladas}$$

#### 4.4.2.1 Valor de uma bateria de capacidade necessária

O preço médio do kWh das baterias marítimas de íon-lítio foi de US\$ 1.500/kWh em 2022, então:

$$\text{Custo da bateria} = \frac{\text{Valor em US\$}}{\text{kWh}} \times \text{capacidade necessária em kWh}$$

$$\text{Custo da bateria} = \frac{\text{US\$ 1.500}}{\text{kWh}} \times 1.358.572,95 \text{ kWh}$$

$$\text{Custo da bateria} = \text{US\$ 2.037.859.425}$$

#### 4.4.2.2 Valor em diesel para o mesmo fornecimento de energia da bateria

O navio em que está baseado os cálculos, consome 165,5 g/kWh com o SFC a 75% do  $MCR_{ME}$  no motor principal e 165,8 g/kWh com o SFC a 50% do  $MCR_{AE}$  no motor auxiliar. No total, são gastos aproximadamente 331,3 g/kWh.

Estima-se que um navio consuma 50 toneladas de combustível por dia, com incerteza de cálculo de 5% para mais ou para menos.

No porto de Roterdã, na Holanda, o VLSFO (*Very Low Sulfur. Fuel Oil*) está sendo vendido na média de US\$ 535/tonelada.

$$\text{Combustível gasto} = \frac{\text{Toneladas}}{\text{dia}} \times \text{dias de viagem}$$

$$\text{Combustível gasto} = \frac{50 \text{ toneladas}}{\text{dia}} \times 20,54 \text{ dias}$$

$$\text{Combustível gasto} = 1.027 \text{ toneladas}$$

$$\text{Valor do combustível gasto} = \text{combustível gasto} \times \text{valor do combustível}$$

$$\text{Valor do combustível gasto} = 1.027 \text{ toneladas} \times \text{US\$ 535}$$

$$\text{Valor do combustível gasto} = \text{US\$ 549.445}$$

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Através dos resultados obtidos, podem ser feitas algumas análises. Diante do cálculo do EEXI, foi constatado que o navio apresentado se enquadra nos níveis de emissões estipulados, apenas utilizando a redução de energia pelo EPL. Com a utilização do EPL, reduzindo algo em torno de 33,5% da potência do motor, foi possível reduzir em 53,5% as emissões de CO<sub>2</sub>, passando de 9,225 para 4,95 gramas de CO<sub>2</sub> por tonelada milha. Para isso, a rotação do motor foi reduzida em 10 rpm.

Para melhorar ainda mais, poderia ser retirado ou reduzido o carbono do combustível, ou mesmo aumentar o *deadweight*. Esta, porém, precisaria de uma mudança de projeto, possível até certo ponto para algumas embarcações.

Da mesma forma, foi calculado o tempo de viagem na rota Paranaguá, Brasil – Roterdã, Holanda, para ver qual seria o impacto da redução de velocidade de cruzeiro no tempo final de viagem. O tempo aumentou 4 dias e 15 horas, aproximadamente, algo em torno de 22,5% de aumento.

Quanto às baterias, a autonomia real depende do peso do veículo carregado, do ciclo de trabalho, da aerodinâmica e da eficiência do sistema de transmissão, bem como de fatores ambientais, como a temperatura. Além disso, atualmente não existe nenhum procedimento de teste harmonizado para medir o alcance elétrico para veículos médios e pesados.

Entretanto, para o cálculo suposto anteriormente, as baterias ainda se mostram extremamente inviáveis, pois uma bateria da capacidade necessária para cumprir a rota proposta, além de representar uma porcentagem relativamente alta do *deadweight* (DWT) de um navio da classe *Suezmax*, a que fica em torno de 150.000 a 160.000 toneladas. Isso tudo desconsiderando as dimensões da bateria, o que traria ainda mais inviabilidades para instalação. Em ordem de grandeza, um tanque de combustível diesel de 1.000 litros pesando 800 kg forneceria a mesma energia que uma bateria de íons de lítio atual de 20.000 kg.

Quanto ao custo da bateria, essa seria a maior inviabilidade, pois o valor gasto para adquirir uma unidade com as características necessárias, seria da ordem de grandeza de que o navio poderia fazer aproximadamente 3.700 viagens na rota

mencionada, ao mesmo custo da aquisição. Isso sem mencionar os custos em decorrência de modificações, instalação, treinamento de pessoal e carga da mesma.

Para muitas embarcações, a solução mais direta é inserir um EPL, isso pode ser feito manualmente por um plugue ou eletrônico dependendo do tipo de motor. Se a potência disponível após a limitação for suficiente para operar a embarcação com segurança e eficiência, provavelmente esse também será o método mais econômico a ser usado.

## 5.2 DISCUSSÃO

Como operar uma embarcação, a forma mais segura e eficiente nem sempre está de acordo com o que o mercado deseja, podem haver alguns conflitos na magnitude da redução de potência. Se for muito alto, a embarcação pode não atender à “necessidade de velocidade” para cumprir um contrato de afretamento, se for muito baixo, pode não atender os limites de emissões. Se uma embarcação estiver em um afretamento de longo prazo e de repente não puder atender às condições do contrato, pode haver um problema com o afretador. Ou se no mercado spot não consegue atender as cláusulas de velocidade disponíveis nos contratos e não consegue carga.

Portanto, é possível operar navios de forma a cumprir as exigências dos afretadores e das normas de emissões de poluentes? A resposta é: sim, é possível manter a operação destes serviços com navios movidos à motores de combustão interna, devendo-se adotar estratégias aliadas a tecnologia disponível para contornar as emissões. E quanto a substituição desses geradores por motores elétricos alimentados por baterias? No presente momento, a substituição total dos motores de combustão interna é impensável por inúmeros fatores, que vão desde os custos de implementação, passando pela falta de estrutura de redes elétricas, de um modo geral, e chegando à defasagem tecnológica das baterias frente ao diesel.

Diante disso, no atual momento, é impensável a substituição da propulsão a diesel nos serviços extrapesados.

## **6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

### **6.1 CONCLUSÃO**

No atual momento, é impensável a substituição da propulsão a diesel nos serviços extrapesados. Seja pelos custos de implementação, falta de estrutura portuária e de redes elétricas que comportem um carregamento de várias baterias de grande magnitude, pelo tempo de carregamento que acarretaria em atraso nos afretamentos, ou mesmo pela tecnologia das baterias ainda estar atrás em desenvolvimento se comparado com o diesel. A energia da bateria pode alcançar a capacidade necessária, mas o diesel é necessário agora e no futuro por sua confiabilidade, mobilidade e eficiência comprovadas.

O diesel é o combustível de motor de combustão interna mais eficiente, transportando cerca de 3,78 kWh de energia em litro de combustível, algo em torno de 27 vezes mais do que as baterias de íon de lítio.

Diante disso, com as legislações cada vez mais rígidas, custos mais elevados e demanda crescente, a eletrônica das embarcações é de extrema importância, pois com um controle rígido de parâmetros, pode-se operar os navios em conformidade com a lei e de forma economicamente viável. Combustíveis sintéticos podem ser aliados a isso, contribuindo ainda mais para a redução das emissões de gases nocivos.

### **6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Diante disso, sugere-se o estudo de combustíveis alternativos ao diesel, visto que a tecnologia de baterias e de rede deve demorar consideravelmente para chegar a um patamar aceitável, confiável e viável financeiramente.

## REFERÊNCIAS

ABECOM. **Você conhece quais os principais tipos de motores elétricos?**

Abecom Rolamentos e Produtos de Borracha. Brasil, 2022. Disponível em: <https://www.abecom.com.br/tipos-de-motor-eletrico/>. Acesso em 02 dez. 2022.

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**. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112590>. Acesso em: 30 out. 2022.

AQUASEG. **Navio: Conceito e regime jurídico**. Laboratório de Estudos em Direito Aquaviário e Ciência da Navegação. Santa Catarina, 2012. Disponível em: [http://www.aquaseg.ufsc.br/files/2012/06/AULA\\_-03\\_04\\_Navio\\_Navega%C3%A7ao.pdf](http://www.aquaseg.ufsc.br/files/2012/06/AULA_-03_04_Navio_Navega%C3%A7ao.pdf). Acesso em: 05 nov. 2022.

BEAUCHET, Sandra et al. **Etude des émissions de Gaz à Effet de Serre des véhicules Superéthanol-E85 en Analyse de Cycle de Vie**. Rueil-Malmaison, 2022. Disponível em: <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-40249-ifpen-etude-comparative-biocarburant.pdf>. Acesso em: 16 out. 2022

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Resolução nº 789, de 22 de maio de 2019. Altera a Resolução ANP nº 52, de 29 de dezembro de 2010, que estabelece as especificações dos combustíveis aquaviários, reduzindo o limite máximo do teor de enxofre nos combustíveis marítimos para as embarcações que não dispuserem de sistema de limpeza de gases de escape. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-789-de-22-de-maio-de-2019-122631742>. Acesso em: 22 out. 2022.

BRUNETTI, Franco. *Motores de Combustão Interna*. 1ª edição. São Paulo. Blucher Editora, 2012.

CAETANO, Mário. **Principais características dos navios**. Ciência e Tecnologia da Borracha. Brasil, 2019. Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/projecto-de-defensas/principais-caracteristicas-dos-navios/>. Acesso em: 17 mar. 2023.

COELHO, Leandro Callegari. **Os diferentes tipos e tamanhos de navios**. Comexblog. Brasil, 2010. Disponível em: <https://comexblog.com.br/logistica/os-diferentes-tipos-e-tamanhos-de-navios/>. Acesso em: 13 nov. 2022.

DENDOKTOOR. **Ship container sea**. Pixbay. Disponível em: <https://pixabay.com/photos/ship-container-ship-containers-sea-6560671/>. Acesso em: 15 nov. 2022.

DIAS, Cláudio do Amaral Barbosa. **Modernos sistemas de propulsão na Marinha Mercante**. Marinha do Brasil, Centro de Instrução Almirante Graça Aranha. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.redebim.dphdm.mar.mil.br/vinculos/000003/00000308.pdf>. Acesso em: 30 out. 2022.

DNV. **CII – Carbon Intensity Indicator**. Noruega, 2021. Disponível em: <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/CII-carbon-intensity-indicator/index.html>. Acesso em: 29 abr. 2023.

DNV. **Study On Electrical Energy Storage For Ships: Battery Systems For Maritime Applications – Technology, Sustainability And Safety**. Noruega, 2020. Disponível em: <https://www.emsa.europa.eu/publications/download/6186/3895/23.html>. Acesso em: 21 mai. 2023.

DOTTORI, Márcio. **Vocabulário náutico**. Minuto Náutico. Brasil, 2019. Disponível em: <http://www.minutonautico.com.br/blog-aprendendo-a-navegar/vocabulario-nautico>. Acesso em: 17 mar. 2023.

EUROPEAN COMMISSION. **'Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality**, Bruxelas, COM(2021), no 550. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0550>. Acesso em: 16 out. 2022.

GOHARY, Mohamed Morsy; SEDDIEK, Ibrahim Sadek. Utilization of alternative marine fuels for gas turbine power plant onboard ships. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, v. 5, n. 1, p. 21-32, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2092678216303673>. Acesso em: 30 out. 2022.

HARRIS, Stephen. **Emissões de Carbono**. Marsh McLennan. Inglaterra, 2021. Disponível em: [https://www.marsh.com/br/industries/marine/insights/carbon-emissions.html#:~:text=A%20partir%20de%201%C2%BA%20de,de%20Navios%20Existentes%20\(EEXI\)](https://www.marsh.com/br/industries/marine/insights/carbon-emissions.html#:~:text=A%20partir%20de%201%C2%BA%20de,de%20Navios%20Existentes%20(EEXI)). Acesso em: 13. nov. 2022.

IEA Organization. **Trends in electric heavy-duty vehicles**. IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/trends-in-electric-heavy-duty-vehicles>. Acesso em 18 mai. 2023.

INDUSTRIAL MARINE POWER. **Eye catching - How to assemble marine diesel engine**. Nova York, 2016. Disponível em: <https://www.industrialmarinepower.com/eye-catching--how-to-assemble-marine-diesel-engine/>. Acesso em: 25 nov. 2022.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). **Effective date of implementation of the fuel oil standard in regulation 14.1.3 of MARPOL Annex VI**. [S.L.]: Imo, 2016. Disponível em: [https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/soxpm/resmepc280\\_70.pdf](https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/soxpm/resmepc280_70.pdf). Acesso em: 22 out. 2022.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). **Energy Efficiency Measures** Imo, 2020. Disponível em: <https://www.imo.org/fr/ourwork/environment/pages/technical-and-operational-measures.aspx>. Acesso em: 06 abr. 2023.

KANTHARIA, Raunek. **What are Ro-Ro Ships?** Marine Insight. Índia, 2019. Disponível em: <https://www.marineinsight.com/types-of-ships/what-are-ro-ro-ships/>. Acesso em: 13. nov. 2022.

KIM, Kyunghwa et al. Analysis of battery/generator hybrid container ship for CO<sub>2</sub> reduction. **IEEE Access**, v. 6, p. 14537-14543, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8320294>. Acesso em: 16 out. 2022

KUNAL, Gaurav. **How does an electric motor works?** Actuate Minds. Índia, 2022. Disponível em: <https://www.actuateminds.com/blog/physics/how-electric-motor-works/>. Acesso em 28 nov. 2022.

LEDUC, Martin. **The marine Diesel engine; Part one: The two stroke.** Diesel Duck. Disponível em: [https://www.dieselduck.info/machine/01%20prime%20movers/diesel\\_engine/diesel\\_engine.01.htm](https://www.dieselduck.info/machine/01%20prime%20movers/diesel_engine/diesel_engine.01.htm). Acesso em: 03 dez. 2022.

LELIS, Breno Fonseca. **O desenvolvimento dos navios gaseiros.** Marinha do Brasil, Centro de Instrução Almirante Graça Aranha. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://www.redebim.dphdm.mar.mil.br/vinculos/000003/00000308.pdf>. Acesso em: 30 out. 2022.

LIMA, Diego Salgado De. **A Propulsão Elétrica Nos Navios Mercantes.** Marinha do Brasil, Centro de Instrução Almirante Graça Aranha. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://www.redebim.dphdm.mar.mil.br/vinculos/000003/00000308.pdf>. Acesso em: 03 dez. 2022.

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**. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102459>. Acesso em: 30 out. 2022.

MARTINS, Jorge. *Motores de Combustão Interna*. 2ª edição. Porto, Portugal: Publindústria, 2006.

METTÄLÄ, Ossi. **The basics of EEXI – from 2023, all existing ships must meet new energy efficiency standards.** NAPA Shipping Solutions. Finlândia, 2021. Disponível em: <https://www.napa.fi/the-basics-of-eexi-from-2023-all-existing-ships-must-meet-new-energy-efficiency-standards/>. Acesso em: 01 dez. 2022.

NAJMAN, Liz. **What is kWh for electric cars?** Recurrent Motors. Estados Unidos, 2021. Disponível em: <https://www.recurrentauto.com/research/what-is-kwh-electric-cars>. Acesso em 03 dez. 2022.

NEDA MARITIME AGENCY. **Crude Oil & Product Tankers**. tankers, 3rd Edition, V4. Grécia, 2013. Disponível em: [https://www.nedamaritime.gr/img/media\\_room/brochures/32P-NEDA-DRY-CARGO.pdf](https://www.nedamaritime.gr/img/media_room/brochures/32P-NEDA-DRY-CARGO.pdf). Acesso em: 13. nov. 2022.

NEDA MARITIME AGENCY. **Dry Cargo Bulk Carriers**. Bulkers, 3rd Edition, V3. Grécia, 2014. Disponível em: [https://www.nedamaritime.gr/img/media\\_room/brochures/32P-NEDA-WET-CARGO.pdf](https://www.nedamaritime.gr/img/media_room/brochures/32P-NEDA-WET-CARGO.pdf). Acesso em: 13. nov. 2022

PANAYI, Adam. **Nergy density and the challenges of electrification for heavy duty vehicles**. Benchmark Minerals. Reino Unido, 2019. Disponível em: <https://www.benchmarkminerals.com/blog-archive/energy-density-and-the-challenges-of-electrification-for-heavy-duty-vehicles/>. Acesso em 20 mai. 2023.

PETROBRAS. **Combustíveis Marítimos: Informações Técnicas**. Brasil, 2021. Disponível em: [https://petrobras.com.br/data/files/02/83/FA/2C/5A39C710E2EF93B7B8E99EA8/Manual\\_Combustiveis\\_Maritimos\\_2021.pdf](https://petrobras.com.br/data/files/02/83/FA/2C/5A39C710E2EF93B7B8E99EA8/Manual_Combustiveis_Maritimos_2021.pdf). Acesso em: 30 out. 2022.

PORTOGENTE. **Navio Graneleiro**. Portopédia. Brasil, 2016. Disponível em: <https://portogente.com.br/portopedia/74241-navio-graneleiro>. Acesso em: 13 nov. 2022.

RIVIERENLAAN, Theo. **MS Celine Rotterdam Ro-Ro Vessel**. Pixabay. Disponível em: <https://pixabay.com/photos/ms-celine-rotterdam-ro-ro-vessel-2965957/>. Acesso em: 15 nov. 2022.

SOUSA, Claudia et al. **Distribuição de combustíveis marítimos no Brasil, em conformidade com o IMO 2020: oportunidades e desafios para o Brasil**. 2020. Disponível em: <https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/handle/10438/30505>. Acesso em: 30 out. 2022.

SPRENGER, Leandro. **Conheça os tipos de navios**. Fazcomex Tecnologia para Comércio Exterior. São Leopoldo, 2022. Disponível em: <https://www.fazcomex.com.br/comex/tipos-de-navios/>. Acesso em: 05 nov. 2022.

STEINER, Leonardo Vilela; SILVEIRA, Tainara; BUSS, Tiago. **A regulamentação IMO 2020 e seus impactos no setor portuário mundial e nacional**. Santa Catarina, 2021. Disponível em: <https://cdn-pen.nuneshost.com/-docindexerpdf/A-regulamentacao-IMO-2020-e-seus-impactos-no-setor-portuario-mundial-e-nacional.pdf>. Acesso em: 22 out. 2022.

SUISCA GROUP. **Types Of Cargo Ships According To The Load They Carry**. Suisca Group. Espanha, 2022. Disponível em: <https://www.suiscagroup.com/en/noticias/types-of-cargo-ships-according-to-the-load-they-carry/>. Acesso em: 15 nov. 2022.

UNFCCC. **Acordo de Paris, COP21**. Paris, 2015. Disponível em: [https://unfccc.int/sites/default/files/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf). Acesso em: 23 out. 2022.

WANKHEDE, Anish. **Electrical Propulsion System in Ships**. Marine Insight. Índia, 2019. Disponível em: <https://www.marineinsight.com/marine-electrical/electrical-propulsion-system-in-ships/>. Acesso em: 03. dez. 2022.

WANKHEDE, Anish. **Why 2-stroke Engines are Used More commonly than 4-stroke on Ships?** Marine Insight. Índia, 2021. Disponível em: <https://www.marineinsight.com/main-engine/why-2-stroke-engines-are-used-more-commonly-than-4-stroke-on-ships/>. Acesso em: 25. nov. 2022.

WIKIMEDIAIMAGES. **Berta Ship Vessel Freight Cargo**. Pixabay. Disponível em: <https://pixabay.com/photos/berta-ship-vessel-freight-cargo-906669/>. Acesso em: 15 nov. 2022.

WILDON ENGINEERING AUSTRALIA. **Differences between Low, Medium, and High Speed Diesel Engines**. Austrália, 2017. Disponível em: <https://wildonengineering.com.au/differences-between-low-medium-and-high-speed-diesel-engines/>. Acesso em 02 dez. 2022.

WITT, Jon. **How EV Batteries Degrade**. Recurrent Motors. Estados Unidos, 2021. Disponível em: <https://www.recurrentauto.com/research/how-batteries-degrade>. Acesso em 03 dez. 2022.

WOODWARD, John B. et al. Ship. **Encyclopædia Britannica**. [s.l.], 2020. Disponível em: <https://www.britannica.com/technology/ship>. Acesso em: 15 nov. 2022.

YANG, Rui et al. **A novel energy management strategy for a ship's hybrid solar energy generation system using a particle swarm optimization algorithm**. *Energies*, v. 13, n. 6, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/6/1380/htm>. Acesso em: 30 out. 2022.

YANG, ZhanLu et al. **Selection of techniques for reducing shipping NOx and SOx emissions, Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Volume 17, Issue 6, 2012, Pages 478-486. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1361920912000557>. Acesso em: 23 out. 2022.

YIN, Roberto K. Estudo de caso: planejamento e métodos. 2ª Ed. Porto Alegre. Bookmam. 2001.

ZHAO, J.; BURKE, A.F. Electric Vehicle Batteries: Status and Perspectives of Data-Driven Diagnosis and Prognosis. **Batteries**. Davis, Califórnia, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/batteries8100142>. Acesso em: 09 abr. 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**. Disponível em:  
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102234>. Acesso em: 30 out. 2022.