



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO - UFPE
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL - BACHARELADO

ARAN JOSÉ DO AMARAL SANTOS

**ESTUDO COMPARATIVO DE IMPACTOS NAS EMISSÕES DE
GASES DE EFEITO ESTUFA PARA UM MOTOR MOVIDO A ÓLEO
COMBUSTÍVEL PESADO E A GÁS NATURAL LIQUEFEITO NUM
NAVIO PORTA CONTÊINER**

Recife-PE
2023

ARAN JOSÉ DO AMARAL SANTOS

ESTUDO COMPARATIVO DE IMPACTOS NAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PARA UM MOTOR MOVIDO A ÓLEO COMBUSTÍVEL PESADO E A GÁS NATURAL LIQUEFEITO NUM NAVIO PORTA CONTÊINER

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval e Oceânica.

Professor Orientador: José Claudino de Lira Júnior

Recife

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Amaral Santos, Aran José do .

ESTUDO COMPARATIVO DE IMPACTOS NAS EMISSÕES DE GASES
DE EFEITO ESTUFA PARA UM MOTOR MOVIDO A ÓLEO
COMBUSTÍVEL PESADO E A GÁS NATURAL LIQUEFEITO NUM
NAVIO PORTA CONTÊINER / Aran José do Amaral Santos. - Recife, 2023.
61 : il., tab.

Orientador(a): José Claudino de Lira Júnior
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Naval -
Bacharelado, 2023.

Inclui referências, apêndices, anexos.

1. Indústria Naval. 2. Transição Energética. 3. Gases de Efeito Estufa. 4.
Gás Natural Liquefeito. I. Lira Júnior, José Claudino de . (Orientação). II.
Título.

620 CDD (22.ed.)



Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Engenharia Mecânica
Graduação em Engenharia Naval
Centro de Tecnologia e Geociências- CTG



ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

Ao vigésimo terceiro dia do mês de Março do ano de dois mil e vinte e três, às 10:30, remotamente via Google Meeting, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Naval da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado: **ESTUDO COMPARATIVO DE IMPACTOS NAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PARA UM MOTOR MOVIDO A ÓLEO COMBUSTÍVEL PESADO E A GÁS NATURAL LIQUEFEITO NUM NAVIO PORTA CONTÊINER**, elaborado pelo aluno **Aran José Amaral dos Santos**, matrícula 111.585.034-23, composta por **Prof. José Claudino de Lira Júnior** (Orientador), **Prof. Demétrius Perrelli Valença**, (examinador 1) e **Jacek Stanislaw Michalewicz**, (examinador 2). Após a exposição oral, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se reservadamente, e deliberaram pela **Aprovação** (*aprovação/reprovação*) do candidato no Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Naval da UFPE, atribuindo à monografia a média **8,0 (oito)**. Para constar, redigi a presente Ata, aprovada por todos os presentes, que vai assinada por mim e pelos demais membros da banca.

Orientador: **Prof. José Claudino de Lira Júnior** - DEMEC/UFPE Nota: 8,0

Assinatura: _____  Documento assinado digitalmente
JOSE CLAUDINO DE LIRA JUNIOR
Data: 12/04/2023 15:21:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br> _____

Examinador 1: **Prof. Demétrius Perrelli Valença** - DEMEC/UFPE Nota: 8,0

Assinatura: _____  Documento assinado digitalmente
DEMETRIUS PERRELLI VALENCA
Data: 18/05/2023 16:50:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br> _____

Examinador 2: **Prof. Jacek Stanislaw Michalewicz** – IFPE. Nota: 8,0

Assinatura: _____  Documento assinado digitalmente
JACEK STANISLAW MICHALEWICZ
Data: 12/04/2023 16:21:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br> _____

Recife, 23 de março de 2023

Prof. Adriano Dayvson Marques Ferreira
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Naval

AGRADECIMENTOS

Antes de todos, Agradeço a Deus, Todo Poderoso, por ter atendido minhas orações para que chegasse até aqui, me dando paciência, força, coragem, todas as virtudes necessárias e pelos livramentos.

Em segundo lugar agradeço a meu pai, Arlindo Morais, e minha mãe, Airan Alecsandra, por tudo que sempre fizeram por mim. Pela educação, pelos valores transmitidos, pelo exemplo de pessoas que são, pelo apoio financeiro, pelo apoio às minhas escolhas na vida de estudos e principalmente pelo direcionamento na vida religiosa. Também agradeço aos meus irmãos Ana e Álvaro. E aos familiares que me deram suporte principalmente no início do curso quando me mudei para Recife, onde os primeiros anos foram financeiramente muito difíceis, mas sobrava vontade.

Não posso deixar de mencionar meu amigo, Igor Caetano, com quem morei durante praticamente toda a graduação. Vivemos e superamos juntos desde os tempos de matemática na UPE muitos momentos de luta, frustrações, desanimação, restrições financeiras, brigas, dores, alegrias e glórias. Também aos meus colegas da engenharia naval, em especial, Daniel, Airton e Paulo Gabriel.

Não posso deixar de mencionar os meus professores que marcaram minha vida de estudos, desde o ensino infantil até hoje, pelos seus serviços e suportes que muitas vezes foram além das suas “obrigações”. Em especial, ao Professor Claudino Lira que não mediu esforço e com a facilidade de quem muito sabe, me orientou no desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço aos amigos e colegas que me ajudaram e torceram por meu sucesso.

RESUMO

A indústria naval atualmente precisa cumprir uma série de regras da Organização Marítima Internacional (IMO) no que diz respeito aos seus impactos ambientais para poder funcionar regularmente. Nesse sentido se discute as possíveis soluções para o setor em todo o mundo. Diante das opções estudadas na revisão bibliográfica, propôs se, entre outros objetivos, fazer uma análise comparativa para um navio movido a óleo Combustível Pesado (HFO) e Gás Natural Liquefeito (LNG) em termos de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) em uma operação no Brasil. Com isso foi evidenciado o grande potencial do LNG para o curto e médio prazo em termos de diminuição da poluição do ar em relação aos outros combustíveis disponíveis atualmente. Alguns dos fatores é sua boa disponibilidade, nível de infraestrutura, desenvolvimento tecnológico do setor e boa reputação mesmo sendo um combustível fóssil. Assim, baseando se nos fatores de emissões dos gases, densidade energética, e no consumo foi mostrada a vantagem ambiental do uso do LNG, também comprovou se seu potencial frente o desafio de diminuição de emissões de GEE do setor e sua capacidade de atender as regras determinadas pela IMO até 2050. Entre outras coisas, concluiu se que deve ser aumentados os investimentos em LNG tanto no sentido de produção, armazenamento e transporte, bem como na produção de embarcações movidas a ele, dando assim a esse combustível a relevância que merece nessa transição energética.

Palavra-chave: Indústria Naval; Transição Energética; Gases de Efeito Estufa; Gás Natural Liquefeito.

ABSTRACT

The shipping industry currently needs to comply with a number of International Maritime Organization (IMO) rules regarding its environmental impacts in order to function regularly. In this sense, possible solutions for the sector worldwide are discussed. In view of the options studied in the bibliographic review, it was proposed, among other objectives, to carry out a comparative analysis for a ship powered by Heavy Fuel Oil (HFO) and Liquefied Natural Gas (LNG) in terms of Greenhouse Gas (GHG) emissions in an operation in Brazil. With this, the great potential of LNG for the short and medium term was evidenced in terms of reducing air pollution in relation to other fuels currently available. Some of the factors are its good availability, level of infrastructure, technological development in the sector and good reputation even though it is a fossil fuel. Thus, based on the factors of gas emissions, energy density, and consumption, the environmental advantage of using LNG was shown, it also proved its potential in the face of the challenge of reducing GHG emissions in the sector and its ability to meet the rules determined by the IMO until 2050. Among other things, it was concluded that investments in LNG should be increased both in terms of production, storage and transport, as well as in the production of vessels powered by it, thus giving this fuel the relevance it deserves in this energy transition.

Keyword: Naval Industry; Energy Transition; Greenhouse gases; Liquefied Natural Gas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estimativa da demanda futura de combustíveis navais	15
Figura 2: Estrutura da metodologia de avaliação de sustentabilidade de combustíveis marinhos	18
Figura 3: Visão geral da metodologia.	23
Figura 4: Margens do diâmetro do propulsor na popa.	33
Figura 5: Curvas de performance do motor.	36
Figura 6: Curva de resistência ao avanço em função da velocidade.	45
Figura 7: relação entre empuxo e velocidade de avanço.	46
Figura 8: Faixa ótima de operação do motor.	48
Figura 9: Consumo específico de Gás natural do motor para operação a gás.	51
Figura 10: Consumo específico de óleo pesado do motor para operação a gás.	51
Figura 11: Consumo específico de óleo pesado para operação a HFO.	52
Figura 13: Fator de emissão de SO ₂ do motor Wartsila 7L46DF.	54
Figura 14: Fator de emissão de NO _x do motor Wartsila 7L46DF.	54
Figura 15: Fator de emissão de CO ₂ do motor Wartsila 7L46DF.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variáveis linguísticas e seus componentes	16
Tabela 2: Visão geral das escolhas metodológicas	21
Tabela 3: Propriedades Principais.....	26
Tabela 4: Restrições geométricas do método de Holtrop	27
Tabela 5: Coeficientes propulsivos.....	34
Tabela 6: Propriedades físicas do LNG.....	38
Tabela 7: Propriedades físicas do HFO.....	38
Tabela 8: Preço médio de combustíveis marítimos.	39
Tabela 9: Emissões de CO ₂ para combustíveis navais.	42
Tabela 10: Emissões de NO _x para combustíveis navais.	43
Tabela 11: Parâmetros da embarcação para o método de Holtrop	45
Tabela 12: Coeficientes da relação casco propulsor.	46
Tabela 13: Resultado da seleção do propulsor com melhor eficiência.	47
Tabela 14: Dados do motor Wartsila 7L46DF.....	48
Tabela 15: Potência das bombas de combustível.	49
Tabela 16: Centrífuga de HFO MAB 206.....	49
Tabela 17: Especificações da unidade de geração auxiliar.	50
Tabela 18: Consumo e custo de combustível.....	52
Tabela 19: Fatores de emissões de GEE dos combustíveis.....	53

LISTA DE SÍMBOLOS

GEE	Gases de Efeito Estuda
LNG	Gás Natural Liquefeito
PM	Material Particulado
HFO	Óleo Combustível Pesado
IMO	Organização Marítima Internacional
EUA	Estados Unidos da América
ULSFO	Óleo Combustível com Baixo Teor de Enxofre
ECA	Área de Controle de Emissão
VLSFO	Óleo Combustível com muito Baixo Teor de Enxofre
MGO	Gásleo Marinho
GTL	Gas-to-liquids
ISO	Organização Internacional de Padronização
LCA	Avaliação de Ciclo de Vida
TAR	Teoria Ator-Rede
CCS	Carbono Capturado e Estocado
MAI	Modelo de Avaliação Integrada
SVO	Óleos Vegetais Simples
HVO	Óleos Vegetais Hidrotratados
DF	Dois Combustíveis
PJ	Peta-Joule
I.E.	Ou seja

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	13
3. METODOLOGIA.....	26
3.1 CARACTERÍSTICAS DA EMBARCAÇÃO	26
3.1.1 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO.....	26
3.1.2 MÉTODO DE HOLTROP	27
3.1.3 RESISTÊNCIA ADICIONAL PELA INCIDÊNCIA DE ONDAS	28
3.2 INTERAÇÃO DO CASCO COM O PROPULSOR	29
3.3 ANÁLISE DA CAVITAÇÃO.....	30
3.4 ESTIMATIVA DE POTÊNCIA.....	31
3.5 DIMENSIONAMENTO DO PROPULSOR.....	33
3.6 SELEÇÃO DO MOTOR	35
3.7 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL.....	37
3.7 CUSTO.....	39
3.9 BALANÇO ELÉTRICO.....	40
3.9.1 GRUPOS DE CONSUMO.....	40
3.10 CÁLCULO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA	42
3.10.1 CO ₂	42
3.10.2 NO _x	43
3.10.2 SO ₂	44
3.10.3 Material particulado (PM)	44
4 RESULTADOS	45
5.1. SISTEMA PROPULSIVO	45
5.2. SELEÇÃO DOS MOTORES.....	47
5.2.1. MOTOR DF	47
5.2.2 BALANÇO ELÉTRICO	49
5.2.3 MOTOR AUXILIAR	50
5.2.4 PREVISÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL	50
6. CONCLUSÃO.....	56
7. TRABALHOS FUTUROS	57

1. INTRODUÇÃO

Não seria exagero dizer que o transporte marítimo é o mais importante modal no mercado global, atualmente responsável por 80% de todo volume transportado no mundo (HOFFMAN, 2021). Junto a ele, a indústria offshore, seja perfuração, produção, armazenamento e transporte de combustíveis fósseis, vem crescendo constantemente nas últimas décadas no Brasil e no mundo. Aqui, puxado pelas constantes descobertas de poços de petróleo e gás natural pela Petrobras, principalmente no conhecido pré-sal, mas também pelo crescimento do comércio global, pois constitui meio com boa viabilidade técnica e financeira, e também boa relação custo/benefício para o escoamento e circulação de matérias-primas e mercadorias do comércio mundial através de navios e embarcações. Dada sua dimensão, os tomadores de decisão envolvidos no setor vem sendo alertados e cobrados quanto aos possíveis impactos ambientais de suas atividades.

Desde algumas décadas atrás, os impactos ambientais - emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), emissões de partículas, vazamentos de óleo, entre outros fenômenos - e a sustentabilidade (econômica, ambiental e social) tem sido foco de preocupações de praticamente todas as atividades econômicas no mercado global. Tanto para empresas e governos, como organizações da sociedade civil. E na indústria marítima não é diferente. Um estudo estimou que o consumo de combustíveis por navios vai aumentar 43,5% até 2050 no melhor cenário analisado (EYRING, 2005). Além disso, segundo a Organização Marítima Internacional (IMO), as emissões de GEE – incluindo dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) – do transporte total (internacional, doméstico e pesqueiro) aumentaram de 977 milhões de toneladas em 2012 para 1.076 milhões de toneladas em 2018 (aumento de 9,6%). Já em 2018 houve um crescimento de 9,3%, para 1,056 milhão de toneladas de emissões de CO₂ (ASARIOTIS et al., 2018).

Entre as consequências dos GEE e partículas na natureza estão a poluição do ar, formação de chuva ácida, aumento da temperatura do ambiente e aceleração de mudanças climáticas. Já para os seres humanos diretamente, pode causar irritação do nariz, garganta e pulmões, causando tosse, falta de ar, chiado no catarro e crise

de arma, irritação de membranas mucosas, sinusite, faringite e bronquite, vertigem e edema pulmonar (IMO).

Diante desse contexto, a IMO definiu metas para reduzir as emissões de GEE dos navios em 50% até 2050 (em comparação com 2008). Além disso, até 2030, as emissões de dióxido de carbono (CO₂) por trabalho de transporte (medido em tonelada x quilômetro) devem ser reduzidas em 40% (em relação a 2008). Para atingir tais metas, pesquisadores e tomadores de decisão têm proposto algumas soluções. Nisso se incluem o aumento da eficiência dos motores a combustão, assim reduzindo o consumo total de combustível e suas emissões de GEE e partículas; a substituição do Óleo Combustível Pesado (HFO) por opções mais limpas, sustentáveis e renováveis como Gás Natural Liquefeito (LNG) – mesmo sendo fóssil, emite bem menos GEE -, combustíveis renováveis como biodiesel, metanol, hidrogênio, amônia e motores elétricos (BRAGGE;CHANTHONGJAROEN, 2021).

Assim, a atividade offshore, forte e em constante crescimento no Brasil principalmente com a Petrobras, precisa e vem também se adequando as novas exigências ambientais. Esse setor que envolve muitas embarcações de apoio, tanto para o transporte de insumos, como para operações de construção, estudo e constante manutenção de plataformas. Para isso, um dos caminhos consiste em buscar novos e mais limpos meios de propulsão, como o LNG que vem sendo apontado por grande parte da indústria como uma solução de transição, que funcionará para o cumprimento no curto e no médio prazo das metas da IMO.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo visa fazer uma revisão da literatura sobre os trabalhos para avaliação das opções de tecnologias de fontes de energia e combustíveis marítimos alternativos. Entre os trabalhos analisados estão estudos, relatórios, artigos em periódicos, dissertações e teses.

Foretich (2021) propôs um método para realizar uma revisão detalhada da literatura para acompanhar o desempenho de combustíveis alternativos em 20 métricas (qualitativas e quantitativas) abrangendo dimensões econômicas, ambientais, de infraestruturas, de segurança e técnicas. Aqui, combustíveis alternativos foram definidos como aqueles que não são amplamente adotados ou padronizados pela indústria marítima. Para cada métrica, foram atribuídas opções de avaliação qualitativa como desfavorável, neutro ou favorável. Nesse caso, utilizou-se por exemplo, perspectivas de tomadores de decisão, revisões da política marinha e da literatura técnica para obter pontuações finais de desempenho. Já para a avaliação quantitativa tem-se a densidade de energia volumétrica relativa e as reduções de emissões de GEE, entre outras.

Seus resultados (FORETICH, 2021) mostraram o crescimento do LNG com o poder dos investimentos em larga-escala em capacidade de infraestrutura, como nos EUA o qual investimentos em extração resultaram em preços em seus portos menores que a metade do preço em portos asiáticos em 2018. Entretanto, fatores de incertezas como a flutuação do preço do combustível, demanda, compatibilidade de infraestrutura em larga escala, habilitação técnica e, principalmente, futuras regulações ambientais fazem as escolhas sobre investimentos em combustíveis complexas. São estimados investimentos entre 1,4 e 1,9 trilhões de dólares para significativas mudanças no sistema de combustíveis da indústria naval dentro do que determina a IMO em normas que serão comentadas adiante. Também, foi destacado que biocombustíveis são promissores candidatos para a próxima geração de combustíveis marítimos por sua capacidade de redução de emissões em seu ciclo de vida, alta densidade energética, compatibilidade com motores marítimos existentes e infraestrutura de abastecimento.

A Alfa Laval (empresa do setor de energia) trouxe à tona em um artigo (ALFA LAVAL, 2020) a pauta de diminuição de emissão de enxofre. Nele foi mostrado o avanço que traz a nova regulamentação (IMO, 2020a) da IMO rumo à diminuição por litro de combustível consumido, esta, sendo limitada a 0,5% m/m desde 2020. Sobre o enxofre: é um elemento natural, presente em todos os combustíveis fósseis. É essencial à vida, mas sua presença na atmosfera como óxidos de enxofre (SO_x) pode, em altas concentrações, causar muitos problemas sérios de saúde e ambientais. Nesse sentido, a indústria naval tem sido um dos maiores emissores de SO_x – por exemplo, em 2007 navios emitiram 15 milhões de toneladas de SO_x, o que equivale a aproximadamente 8 % das emissões globais.

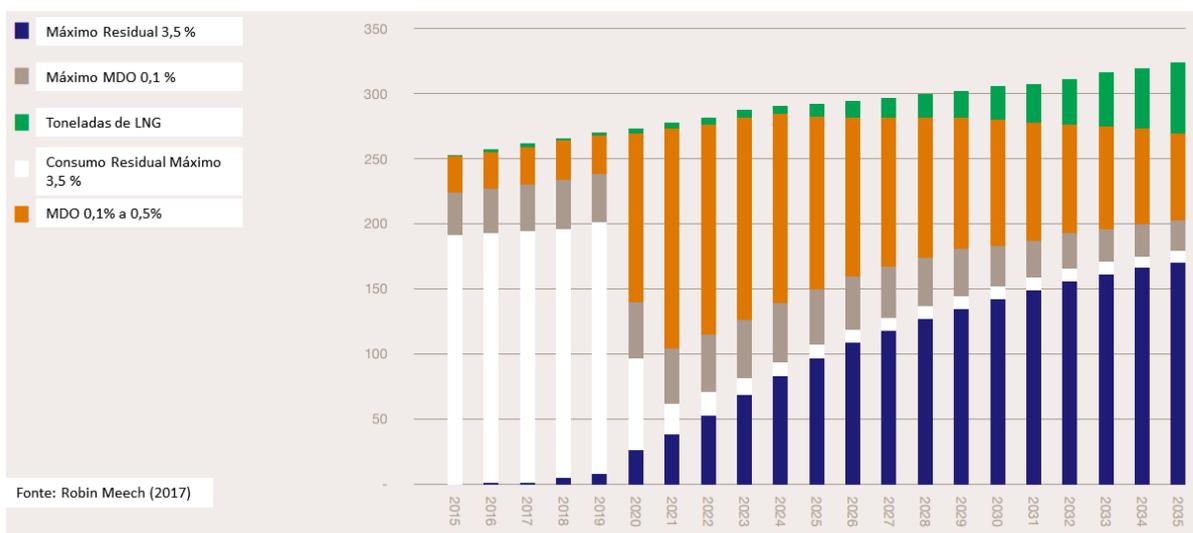
Além disso, espera-se que os combustíveis pós 2020 caiam em cinco principais categorias que serão comentadas a seguir. O óleo combustível com ultra baixo teor de enxofre (ULSFO) é uma gama de novos combustíveis que entraram no mercado para atender aos requisitos de 0,10% de Áreas de Controle de Emissões (ECA) definidas pela IMO. Eles são destilados puros, mas também podem ser híbridos. Funcionam bem com configuração de motor padrão, embora possam exigir alterações operacionais. O óleo combustível com muito baixo teor de enxofre (VLSFO) é a mistura de produtos residuais do refino misturado com destilados com baixo teor de enxofre para criar combustíveis compatíveis de boa qualidade podendo conter até 40% de resíduos, mas ainda assim ser mantidas abaixo do limite de 0,5% de enxofre, entretanto ele apresentam alto risco de instabilidade.

O óleo combustível pesado com purificadores é uma opção viável para alguns navios onde os novos e eficientes purificadores conseguem filtrar a emissão de enxofre de combustíveis tradicionais a níveis dentro do que determina as regulamentações. O LNG tem o teor de enxofre bem abaixo do limite regulamentar, propriedades de queima consideravelmente limpas, mas tem como ponto negativo o alto custo de reequipamento, fabricação, transporte e armazenamento para a maioria dos operadores.

Para a ExxonMobil 12% do combustível usado em 2040 será gás. E também uma série de outros tipos de combustíveis começaram a entrar na lista de possibilidades. Isso inclui biocombustíveis – também conhecidos como FAME (ácido graxo metil éter) – combustíveis extraídos de resíduos plásticos, metanol e outros

novos tipos ainda não comercializados. Alguns desses combustíveis exibem propriedades que são problemáticas para uso marinho, como um alto risco de crescimento microbiano. No entanto, o biodiesel é isento de enxofre e tem lubricidade relativamente alta. Esses tipos de combustíveis permanecem muito caros para serem considerados uma escolha atraente por conta própria, mas podem ser úteis para misturar com outros combustíveis para reduzir o teor de enxofre. Além disso, a transição energética não será suave e o desafio será enorme na cadeia de suprimentos e também para armadores que precisarão se preparar para o gerenciamento do uso individual e combinado de combustíveis mais variados. A Figura 1 mostra dados de estimativa da demanda futura de combustíveis navais.

Figura 1: Estimativa da demanda futura de combustíveis navais



Fonte: Robin Meech, 2017.

Em outro estudo (REN; LIANG, 2017) foi feita uma metodologia para avaliação de sustentabilidade de combustíveis marítimos alternativos e para determinar qual é o combustível marítimo mais sustentável entre diversas alternativas. Além disso, foi feito um estudo de caso com o LNG, o LH₂ e o metanol. O primeiro apesar de contestado em partes por ser um combustível fóssil, apresenta ótimas características ambientais em relação ao tradicional HFO, combustível mais usado atualmente. O LNG tem uma performance marginal melhor do que o HFO no impacto ambiental em seu ciclo de vida, produzindo 92% menos emissões.

Na metodologia, um sistema de critérios para avaliação de sustentabilidade de combustíveis navais que inclui onze critérios em aspectos ambientais, econômicos,

tecnológicos e sociais. São eles: redução de emissão de CO₂, efeito na redução de emissão de NO_x, efeito na redução de emissão de SO_x, efeito na redução de emissão de PM, custo de capital, custo operacional, maturidade tecnológica, confiabilidade, conformidade com as normas, e aceitação social, foi inicialmente desenvolvido. Usou-se posteriormente o método de mínimos quadrados de logaritmo indistinto para determinar os pesos dos critérios para avaliação da sustentabilidade de cada combustível, depois a TDOSSI (técnica para o desempenho da ordem por similaridade com a solução ideal) é usado para determinar os índices de sustentabilidade e finalmente a ordem de sustentabilidade dos combustíveis.

Para melhor compreensão, a Figura 2 ilustra a estrutura da metodologia. No método de mínimos quadrados em sua principal fase é feita a transformação das variáveis linguísticas em matrizes de comparação, que foram determinadas pelos tomadores de decisão/stakeholders. Assim, “moderadamente importante” (MI) poderia ser transformado em escala difusa (2,3, 4).

A tabela 1 ilustra todas as variáveis linguísticas que servem para comparar a importância relativa de cada critério em relação aos outros. Os resultados indicaram o hidrogênio como o combustível marítimo mais sustentável e as razões são as seguintes: 1) melhor performance ambiental; 2) maior renovabilidade; 3) maior conformidade com políticas governamentais; 4) maior aceitação social. Uma das vantagens do método é que as opiniões dos tomadores de decisão são levadas em consideração na avaliação, mas vale ressaltar, há também a limitação que pode ser melhorada no futuro, de que todos os dados usados no estudo são baseados em julgamento humanos. Assim, futuros trabalhos devem adicionar métodos baseados em números claros (objetivos).

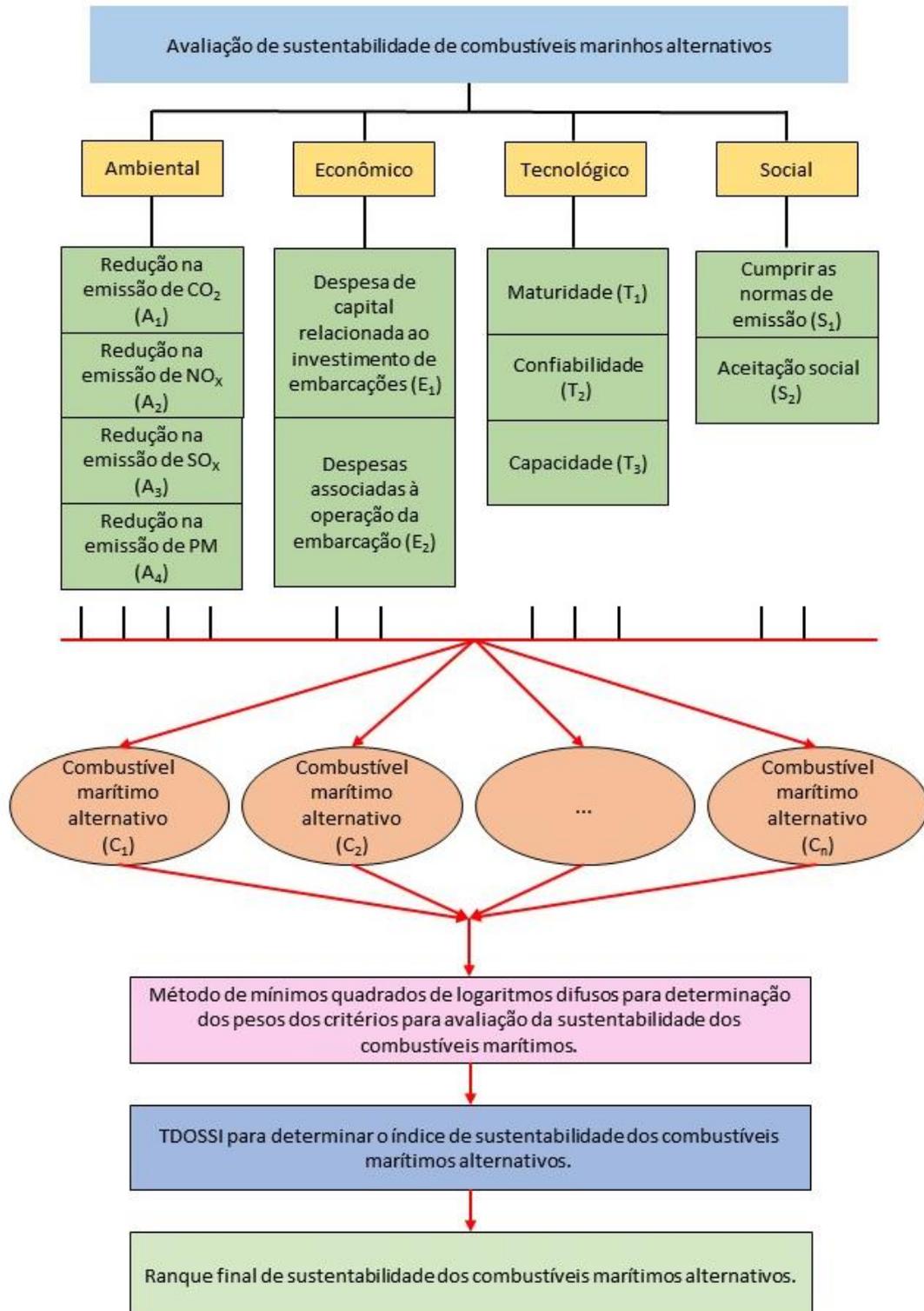
Tabela 1: Variáveis linguísticas e seus componentes

Variáveis linguísticas	Abreviações	Escalas difusa
Igualmente Importante	II	(1, 1, 1)
Fracamente Importante	FI	(1, 2, 3)
Moderadamente Importante	MI	(2, 3, 4)
Moderadamente Plus	MP	(3, 4, 5)
Fortemente Importante	FI	(4, 5, 6)
Fortemente Plus	FP	(5, 6, 7)
Muito Fortemente	MF	(6, 7, 8)
Muito, Muito Fortemente	MM	(7, 8, 9)

Extremamente Importante	EI	(8, 9, 9)
Reciprococ de cima	Adiciona "R" às abreviações a cima	Para um número (a^l , a^m , a^u), seu recíproco pode ser determinado como $(\frac{1}{a^u}, \frac{1}{a^m}, \frac{1}{a^l})$

Fonte: Ren e Liang, 2017.

Figura 2: Estrutura da metodologia de avaliação de sustentabilidade de combustíveis marinhos



Fonte: Adaptado de Ren e Liang, 2017.

Baseadas em dados disponíveis na literatura e em sua própria experiência com projetos e operação de sistemas de LNG, (NERHEIM; ÆSØY; HOLMESET, 2021a), foram feitas análises e discussões sobre vantagens e desvantagens dos combustíveis marítimos de hidrogênio líquido (LH₂) e LNG para embarcações de longo curso. Atualmente, existem 198 navios movidos a LNG em operação no mundo, e mais 277 estão em ordem de serviço. Também, o LNG é o mais ecológico combustível fóssil no mercado para fins marítimos. Sua queima não produz emissões de enxofre (SO_x), tem baixas emissões de partículas e as de nitróxidos (NO_x) são menores do que as de combustíveis fósseis convencionais. Em comparação com eles, a combustão de gás reduz as emissões de SO_x e partículas em quase 100%, e NO_x em 85% a 90%. Por outro lado, o hidrogênio vem sendo usado há décadas como combustível na indústria espacial, embora ainda não exista nenhum navio funcionando com ele. Seu benefício para se tornar o combustível marítimo preferido no futuro é que as emissões da indústria marítima podem ser ainda mais reduzidas ou até eliminadas.

Este trabalho (NERHEIM; ÆSØY; HOLMESET, 2021b) foi baseado em dados disponíveis na literatura sobre várias propriedades do hidrogênio, do LNG, e também nas próprias experiências dos autores com projeto e operações de sistemas. Cabe ressaltar que o gás natural e o hidrogênio podem ter o estado gasoso, líquido ou os dois, dependendo da condição de temperatura e pressão. LNG é o gás natural em que tem sua temperatura mantida tão baixa que o deixa no estado líquido em pressão atmosférica. Mostrou-se que o LNG é aproximadamente 2,5 vezes mais denso energeticamente do que o LH₂, o que é muito importante dada a limitação espaço existente nos projetos dos navios e consequente redução de capacidade de carga.

A disponibilidade de LH₂ ainda é limitada para ser um combustível alternativo comercial. Em comparação com o LNG, ele tem um tempo de armazenamento mais limitado. Por isso, é importante produzir LH₂ o mais próximo possível do consumidor e reduzir o número de operações de recarga. Apesar de poder ser mais limpo e renovável do que o LNG, o LH₂ é um combustível ainda mais desafiador quando se trata de segurança, cadeia de suprimentos e maturidade tecnológica. Isso se deve à baixa temperatura em que deve ser mantido, ao maior risco de vazamentos, ao maior alcance de inflamabilidade, à menor energia de ignição, à sensibilidade ao vazamento de calor e à menor densidade de energia.

Visando alternativas imediatas já presentes no mercado e com estruturas e tecnologias já avançadas, um estudo (BRYNOLF; ANDERSSON; FRIDELL, 2011) comparou alternativas de combustíveis fósseis (LNG, HFO, MGO e GTL) usando o método de avaliação de ciclo de vida, i.e., uma ferramenta para avaliação ambiental de produtos e serviços que aborda o impacto potencial em uma perspectiva do “berço ao túmulo”). O HFO vem sendo usado em navios desde o início dos anos 60. Em 2007, dos 350 milhões de litros de combustíveis queimados por navios, 250 milhões foram HFO. Porém, para cumprir as regras de emissões, através de medidas técnicas nas refinarias, com o craqueamento catalítico e a hidrodesnatação, podem ser produzidos combustíveis marinhos com baixo teor de enxofre (com 0,5 a 0,1%).

A disponibilidade e o preço destes combustíveis com baixo teor de enxofre são, no entanto, consideradas limitações. Já o LNG tem como característica o baixo teor de enxofre, menor que 0,01% e também ainda existe em considerável abundância, podendo inclusive ter sua disponibilidade aumentada com a descoberta de novas reservas. Uma parte negativa fica com fato de exigir um espaço a bordo do navio até 3 vezes maior e ser ambientalmente prejudicial por causa do possível deslizamento de metano CH₄.

Ainda, foram usadas dois padrões disponíveis da Organização Internacional de Padronização – ISSO - (a 14040 e a 14044) para a avaliação de ciclo de vida. Eles incluíram extração de matéria prima, produção e transporte, abastecimento, armazenamento e por último a combustão do combustível para o transporte de carga. Há uma série de escolhas metodológicas a serem feitas ao conduzir uma análise de ciclo de vida (LCA). As escolhas mais importantes neste estudo (BRYNOLF; ANDERSON; FRIDELL, 2011) estão resumidas na Tabela 2. Os resultados mostraram que o uso de LNG em vez de HFO reduziu as emissões de NO_x e SO₂ em 82–90% e 78–90%, respectivamente. Os autores também afirmam que as emissões de LNG e HFO nas fases de produção e distribuição são semelhantes, mas o desempenho ambiental do HFO é muito pior durante uso em operação.

Tabela 2: Visão geral das escolhas metodológicas

<p>Unidade Funcional Tipo de LCA Horizonte de tempo Fronteiras geográficas</p>	<p>Uma tonelada de carga transportada um km com um navio RoRo Consequente 2010-2020 As SECAs no norte da Europa (Canal da Mancha, Mar do Norte e Mar Báltico).</p>
<p>Limites do Sistema</p>	<p>O estudo inclui todas as atividades desde a extração de matéria-prima até a liberação de resíduos para o meio ambiente, por exemplo, do berço à hélice. A produção de óleo lubrificante não está incluída no sistema, nem o tratamento de resíduos de borra de óleo e óleo lubrificante usado. Estima-se que as diferenças no uso de óleo lubrificante entre os tipos de combustível investigados sejam pequenas. A quantidade de lodo e resíduos sólidos pode diferir mais entre as alternativas, por ex. uma vez que o GNL e o GTL são combustíveis muito mais limpos do que o HFO, mas o tratamento do lodo não foi incluído. A fabricação de bens de capital não está incluída neste estudo, por exemplo, a fabricação do vaso, do conversor catalítico e do lavador de gases.</p>
<p>Alocação</p>	<p>A alocação do refino de petróleo bruto e da produção de gás natural é feita com base no conteúdo energético (menor poder calorífico) dos produtos.</p>
<p>Categorias de Impacto</p>	<p>Potencial de aquecimento global (GWP) de 100 anos (dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O)). 1 g de CH₄ e 1 g de N₂O é considerado equivalente a 25g e 298 g de CO₂ equivalentes, respectivamente.</p> <p>Potencial de acidificação (monóxido de nitrogênio (NO), dióxido de nitrogênio (NO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO₂), amônia (NH₃)). 1 g de NO, 1 g de NO₂, 1 g de NO_x, 1 g de SO₂ e 1 g de NH₃ é considerado equivalente a 1,07g, 0,7g, 0,7g, 1g, 1,88g equivalentes de SO₂, respectivamente.</p> <p>Potencial de eutrofização (monóxido de nitrogênio (NO), dióxido de nitrogênio (NO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), amônia (NH₃)). 1 g de NO, 1 g de NO₂, 1 g de NO_x e 1 g de NH₃ são considerados equivalentes a 0,2g, 0,13g, 0,13g e 0,35g PO³⁻₄ equivalentes, respectivamente.</p>

Fonte: Brynolf, Andersson e Fridell, 2011.

Mais recentemente, (TVEDTEN; BAUER, 2022) trataram da discussão sobre a possibilidade de o LNG servir como bom combustível de transição atendendo as regulamentações então vigentes da IMO ou se estaria atrasando a transição para combustíveis totalmente limpos na Noruega, como o hidrogênio e a amônia. Para isso eles recorreram a estudos baseados na TAR (Teoria Ator-Rede). Essa teoria tem como uma de suas proposições centrais que atores humanos e não humanos, como combustíveis, infraestrutura de abastecimento e documentos regulatórios, participem da formação do mundo. Também, o estudo baseou-se em dados qualitativos incluindo

entrevistas (com armadores, empresários, organizações e políticos), observadores participantes e análise documental.

Fato importante é a existência de duas regulações chaves no que envolve combustível naval e transmitem a política nacional no setor. Assim, foram destacados dois pontos: 1) de que forma o LNG surgiu como opção de combustível e posteriormente combustível naval; 2) a regulação que criou a taxa de carbono para incentivar o desenvolvimento e uso de combustíveis com emissão zero, como o hidrogênio.

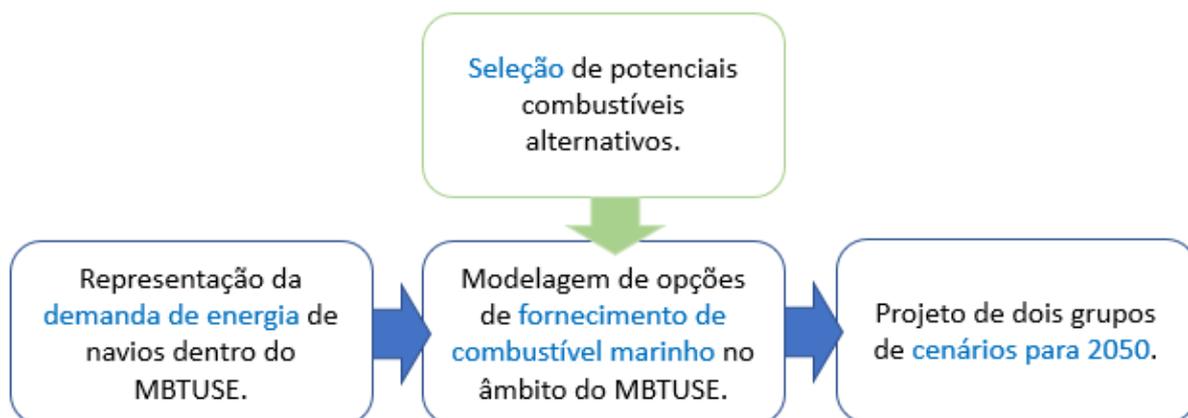
Atores importantes da indústria naval fizeram relatórios importantes defendendo que o LNG oferecia bom desempenho como combustível de baixa emissão para navios que operam em distâncias relativamente longas ao longo da costa norueguesa, onde a tecnologia de bateria elétrica era insuficiente, os biocombustíveis eram difíceis de encontrar e caros, e o hidrogênio e a amônia ainda estavam sendo desenvolvidos como combustíveis para navios. Além disso, os navios movidos a hidrogênio apresentam desafios substanciais, incluindo custos potencialmente altos, acessibilidade e infraestrutura de abastecimento limitada, sem mencionar que o hidrogênio é altamente explosivo, porém prevalece o entusiasmo dos formadores de políticas noruegueses com ele. Instalações de produção de hidrogênio estão em fase de planejamento, fábricas de células de combustível estão em construção e projetos piloto estão testando hidrogênio em motores de combustão. O hidrogênio é um portador de energia e não uma fonte de energia, o que significa que precisa ser produzido a partir de outras fontes de energia.

Atualmente, o hidrogênio é produzido principalmente por meio de um processo de “reforma” de combustíveis fósseis, que é a conversão de hidrocarbonetos, e tem sido referido como “hidrogênio cinza” quando produzido a partir de gás natural. Até agora, apenas pequenas proporções de hidrogênio são atualmente produzidas por meio de eletricidade gerada por fontes de energia renováveis e usando eletrólise da água, e é frequentemente referido como “hidrogênio verde”. O hidrogênio também tem sido rotulado com outra cor – “azul” – que se refere a uma forma de produção potencial de hidrogênio, combinando gás natural e carbono capturado e estocado (CCS), onde os proponentes imaginam que a maior parte do CO₂ que é emitido na produção de hidrogênio a partir do gás natural, com exceção de algum percentual, podem ser

capturados e armazenados. Os resultados mostraram que, o LNG é um bom combustível marítimo de transição. Mas o hidrogênio azul aparece como mais promissora alternativa para praticamente zerar as emissões.

Vale frisar ainda o trabalho de (MÜLLER-CASSERES, 2021a) que objetivou fornecer uma perspectiva de Modelo de Avaliação Integrada (MAI) da produção e distribuição de combustíveis marítimos alternativos nos portos brasileiros, no qual o modelo nacional MAI BLUES é adaptado para representar a parte relevante do setor marítimo internacional. Um conjunto de cenários é desenvolvido considerando diferentes alternativas de combustível, pressupostos de demanda e metas nacionais de mitigação. A metodologia está ilustrada na Figura 1. Em seus resultados, O LNG, por exemplo, destaca-se como uma alternativa promissora no caso de apenas emissões de CO₂ serem contabilizadas dentro das metas de IMO, enquanto é substituído por Óleos Vegetais Simples (SVO) e Óleos Vegetais Hidrotratados (HVO), quando se considera as emissões totais de GEE.

Figura 3: Visão geral da metodologia.



Fonte: Adaptada (MÜLLER-CASSERES et al., 2021b).

Para identificar as capacidades regionais, implicações econômicas e barreiras para produzir biocombustíveis em diferentes regiões, o trabalho de (CARVALHO, 2021) usou uma metodologia que foi dividida em duas etapas. A primeira teve como objetivo identificar pontos de localização de bioenergia para a implantação de refinarias de biocombustível pela quantificação do potencial técnico de bioenergia e uma análise georreferenciada (ela permite a identificação espacial de “pontos quentes” de biomassa e é útil para avaliar sua proximidade com portos, infraestrutura

de manuseio de combustível e redes de transporte nessas áreas.). O segundo passo determinou os custos totais de biocombustíveis, compostos por custos de matérias-primas, custo nivelado do combustível e custo de transporte de combustível. Assim, foi estimado potencial técnico de resíduos de biomassas totalizado 45 PJ/ano na África do Sul, 3050 PJ/ano nos EUA, 3903 PJ/ano no Brasil e 4083 PJ/ano na Europa. Além disso, o SVO tem um potencial técnico no Brasil total de aproximadamente 1000 PJ/ano.

Entre os combustíveis marítimos mais promissores, segundo alguns especialistas, para melhorar o desempenho ambiental do setor energético está a amônia. Nesse sentido, (HANSSON, 2020) mostrou que no longo prazo e para alcançar a redução global de GEE, o uso de hidrogênio representa um maior custo-benefício do que ela, mas pode ser uma opção interessante desde que algumas questões sejam bem resolvidas. Em sua metodologia, foi usada modelagem de sistemas de energia, incluindo o custo-benefício da amônia em relação a outros combustíveis, e também uma análise de decisão multicritérios classificando as opções de combustível marítimo, considerando o desempenho estimado do combustível e a importância dos critérios com base nas preferências nas partes interessadas (stakeholders).

Assim, esses estudos em sua maioria mostraram a relevante importância que o LNG tem e que continuará a ter durante pelo menos as próximas duas décadas nessa transição energética que está acontecendo no mundo. Eles destacam o fato dele reduzir a quase zero a emissão de enxofre e partículas e também reduzir consideravelmente o dióxido de carbono, ter bom nível de disponibilidade e maturidade tecnológica da cadeia de produção, transporte, armazenamento e abastecimento.

O presente trabalho propõe a comparação entre duas soluções de combustível para um navio porta contêineres chamado Princesa Isabel que opera na costa brasileira, mais especificamente entre o porto de Santos e o de Suape. Dada a dimensão do litoral brasileiro, cerca 8 mil quilômetros, a visão da vantagem do transporte marítimo tem feito crescer a demanda de transporte de mercadorias por cabotagem. Nesse sentido, ele tem a finalidade de mostrar as vantagens econômicas

e principalmente ambientais da propulsão com DF (motores alimentados por dois combustíveis) e com LNG em relação ao HFO tradicional.

Diante das mudanças climáticas e das regulamentações da IMO busca-se neste trabalho trazer contribuições para a obediência às metas de emissões estabelecidas, e assim, agregar para o desenvolvimento sustentável, ambientalmente correto e que possibilite menores custo de operação de transporte no contexto citado. Além disso, busca dar suporte na garantia da legalidade das operações, sabendo que não estando de acordo com as normas vigentes as operações devem ser proibidas pelos órgãos de fiscalização competentes, seja a Marinha do Brasil em âmbito nacional ou a IMO no internacional.

Assim, os objetivos deste trabalho são: fazer uma revisão bibliográfica, definir uma embarcação que melhor atenda a proposta do estudo, definir o melhor arranjo de propulsão e motor, mostrar a vantagem econômica e ambiental do navio com solução DF em relação ao HFO tradicional, estimando seus custos de operação, bem como seus números de emissões de GEE.

Esse trabalho está estruturado com os capítulos introdução, revisão bibliográfica, metodologia, resultados, conclusão e referências bibliográficas.

3. METODOLOGIA

3.1 CARACTERÍSTICAS DA EMBARCAÇÃO

Essa é uma embarcação de cabotagem, i.e., navega no litoral brasileiro, mais exatamente entre os portos de Santos - SP, Rio de Janeiro - RJ, Salvador - BA e Suape atuando sempre carregado na ida e volta com pelo menos 70% da capacidade máxima. Ela foi projetada baseada em navios semelhantes e de modo a solucionar o problema citado. O navio transporta no máximo 1625 contêineres de 20' (ou o equivalente de 40) e cada contêiner deve transportar no máximo 28 toneladas.

Tabela 3: Propriedades Principais.

Comprimento (LOA)	175,92 m
Boca (B)	19 m
Pontal (D)	16,51 m
Calado (T)	8,5 m
Peso morto (DWT)	31850 t
Velocidade de Serviço (V_s)	16,7 nós
Número de Contêineres	1625
Potência	6209 kW
Tripulantes	27

Fonte: O autor, 2023.

3.1.1 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO

O cálculo da resistência ao avanço da embarcação foi feito utilizando o software *Maxsurf Resistance*. Ele é um software de arquitetura naval usado principalmente para o projeto de embarcações marítima, ele inclui recursos para modelagem de casco, estabilidade, previsão de movimentos e resistência, modelagem estrutural, análise estrutural e exportação para detalhamento de embarcações. O *Maxsurf* opera a partir de um único modelo 3D paramétrico, a fim de garantir uma comunicação e coordenação suaves entre os vários envolvidos no projeto. Com ele foi obtida a curva de resistência em função da velocidade.

O método utilizado foi o de Holtrop que é melhor explicado no parágrafo a baixo.

3.1.2 MÉTODO DE HOLTROP

O método Holtrop para estimativa da Resistência ao Avanço é um método estatístico baseado na análise de regressão de experimentos de modelo aleatórios e dados em escala real disponíveis na Netherlands Ship Model Basin. Ele é um método usado para estimar a resistência de navios com coeficiente de bloco alto e razões de comprimento e boca (L/B) baixas. Na tabela 4 estão apresentadas as restrições geométricas.

Tabela 4: Restrições geométricas do método de Holtrop

Parâmetro	Valor mínimo	Valor máximo
C_p	0,55	0,85
L/B	3,9	15
B/T	2,1	4
F_n	0,05	1

Fonte: *MaxSurf*, 2023.

A estimativa de resistência total do casco é feita somando-se a resistência nas seguintes parcelas:

$$R_{T,C} = R_F(1 + k) + R_W + R_{APP} + R_B + R_{TR} + R_A \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

R_F : resistência friccional;

$1 + k$: fator de forma que descreve a resistência viscosa do casco com relação à R_F ;

R_{APP} : resistência pela presença de apêndices (e.g., lemes, bolinas, pés de galinha);

R_W : resistência pela geração de ondas;

R_B : resistência de pressão adicional pela presença do bulbo;

R_{TR} : resistência de pressão adicional da popa transom submersa;

R_A : resistência de correlação entre modelo e protótipo;

A equação para o cálculo da resistência friccional proposta pelo *International Tower Tank Conference* (ITTC) é dada em termos de um coeficiente friccional (C_F). O coeficiente é dado pela expressão a seguir:

$$C_F = \frac{0,075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde, Re é o número de Reynolds. Então, a resistência é obtida pela seguinte expressão:

$$R_F = \frac{1}{2} C_F \rho V^2 S \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

ρ : massa específica do fluido;

V : velocidade da embarcação;

S : área molhada da embarcação.

3.1.3 RESISTÊNCIA ADICIONAL PELA INCIDÊNCIA DE ONDAS

O ITTC propôs a correção da resistência pela incidência de ondas. Para isso, foram feitos testes com modelos recebendo ondas de mesma altura pela proa e com comprimentos de ondas diferentes, a várias velocidades. A fórmula que a representa está ilustrada abaixo é como um acréscimo na resistência total (R_T).

$$\Delta R_T = 0,64 \rho g \zeta_w^2 B^2 C_B / L \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

g : aceleração da gravidade;

ζ_w : altura significativa da onda (m);

C_B : Coeficiente de bloco;

A resistência total é calculada então como:

$$R_T = R_{T,C} + \Delta R_T \quad (\text{Eq. 5})$$

3.2 INTERAÇÃO DO CASCO COM O PROPULSOR

O coeficiente de esteira (w) e de redução de empuxo (t) quantificam a interação do casco com o propulsor. O casco altera a distribuição de velocidades na região em que opera o propulsor, essa alteração é vista pela formação da esteira, região do escoamento altamente não uniforme e não permanente, caracterizada por efeitos viscosos. A correção da velocidade que chega ao propulsor, a partir de agora chamada de velocidade de avanço (V_A), baseado na velocidade do navio (V) é dada da seguinte forma:

$$V_A = V(1 - W) \quad (\text{Eq. 6})$$

Além do casco alterar o escoamento, o propulsor operando também altera o campo de velocidades. Uma vez que o propulsor opera a altas rotações, a pressão a ré diminui mais ainda, havendo um acréscimo na resistência de pressão viscosa, sendo, portanto, necessário um empuxo maior para poder vencer a resistência ao avanço inicialmente estimada. O empuxo necessário é então dado por:

$$T = \frac{R_T}{1 - t} \quad (\text{Eq. 7})$$

Alguns métodos podem ser utilizados para estimar o valor do coeficiente de esteira, w . Foi escolhido entre eles uma formulação empírica proposta por Taylor em 1933 e está apresentada na equação 8 a seguir, para navio de um propulsor.

$$w = -0,05 + 0,5C_B \quad (\text{Eq. 8})$$

O coeficiente de redução pode, então, ser obtido a partir do coeficiente de esteira como definido na equação 9.

$$t = kw \quad (\text{Eq. 9})$$

Os valores de k são definidos a partir das configurações instaladas na embarcação, onde:

k : 0,5 – 0,7 para navios equipados com contra lemes;

k : 0,7 – 0,9 para navios equipados com dupla chapa;

k : 0,9 – 1,05 para navios equipados com chapas velhas;

Foi definido para o projeto atual um valor de k igual 0,6; representando uma média para navios equipados com lemes hidrodinâmicos.

3.3. ANÁLISE DA CAVITAÇÃO

Foi utilizado o critério de Keller para minimizar os efeitos de cavitação, fenômeno no qual o líquido muda de fase pela queda de pressão devido as altas velocidades que podem ocorrer em regiões do propulsor. É necessária uma análise profunda quanto a esse efeito devido às possíveis repercussões, se ocorrer constantemente esse efeito. Os impactos podem ser a redução de empuxo, a vibração e a erosão nas pás do hélice.

A equação 10 apresenta o critério de Keller, que relaciona a razão entre a área desenvolvida e a área do disco para que seja pelo menos o resultado obtido a partir dos parâmetros a abaixo citados.

$$\frac{A_D}{A_0} = \frac{(1,3 + 0,3)T}{(P_0 - P_V)D^2} + k \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde:

T : empuxo que o propulsor fornece;

Z : número de pás;

P_0 : pressão hidrostática no eixo do propulsor;

P_V : pressão de vaporização da água;

k : constante que vale 0,2 para navios com um propulsor; 0,1 para navios mercantes com dois propulsores e 0,05 para navios militares.

3.4. ESTIMATIVA DE POTÊNCIA

O motor é responsável por fornecer o torque necessário para que o propulsor possa gerar o empuxo para propelir a embarcação. Para que o motor possa fornecer tal torque, é preciso estimar a potência que o propulsor precisa para, a partir daí, obter a potência que o motor precisa ter. As potências e eficiências presentes no sistema propulsivo são as seguintes:

a) Potência efetiva (EHP): é a potência necessária para vencer a resistência total ao avanço a uma determinada velocidade

$$EHP = R_T V \quad (\text{Eq. 11})$$

b) Potência indicada (IHP): é a potência gerada dentro do cilindro do motor.

c) Potência ao freio (BHP): é a potência máxima gerada pelo motor a uma dada RPM.

d) Potência no eixo (SHP): é a potência transmitida pelo eixo até o propulsor.

e) Potência entregue ao hélice (DHP): potência recebida pelo propulsor, é dependente do torque que o propulsor pode gerar:

$$DHP = 2\pi n Q \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde Q é o torque do propulsor e n , as rotações do propulsor.

f) Potência no propulsor (THP): é a potência fornecida pelo propulsor, a potência útil:

$$THP = T V_A \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde T é o empuxo fornecido pelo propulsor.

Essas potências se relacionam por meio das eficiências, desse modo, é possível, por meio do EHP, encontrar o BHP do motor, e assim selecionar aquele que garantirá a operação. As eficiências são as seguintes (MANNEN; OOSSANEM; VORUS, 1988):

- a) Eficiência do casco (η_h): é eficiência que considera os efeitos da interação do casco com o propulsor, relacionando o quanto da potência fornecida pelo propulsor é aproveitada para vencer a resistência ao avanço:

$$n_h = \frac{EHP}{THP} = \frac{R_T V}{TV_A} = \frac{1-t}{1-w} \quad (\text{Eq. 14})$$

- b) Eficiência rotativa relativa (η_{rr}): eficiência que relaciona a potência fornecida pelo propulsor, se tivesse operando em águas abertas (EHP_{open}), com a potência realmente fornecida.

$$n_{rr} = \frac{DH_{open}}{DHP} \quad (\text{Eq. 15})$$

Ela pode ser estimada a partir da seguinte fórmula:

$$n_{rr} = 0,9737 - 0,06325 \left(\frac{A_D}{A_0} \right) + 0,111(C_p - 0,0225LCB) \quad (\text{Eq. 16})$$

- c) Eficiência em águas abertas (η_0): relaciona a potência que propulsor fornece com a potência que chega ao hélice, se estivesse operando em águas abertas.

$$n_0 = \frac{THP}{DHP_{open}} = \frac{TV_A}{2\pi n Q_0} \quad (\text{Eq. 17})$$

- d) Eficiência do eixo (η_s): mede as perdas existentes ao longo do eixo do propulsor, devido à presença dos mancais e uniões. É a razão entre a potência que chega ao propulsor com a fornecida pelo eixo.

$$n_s = \frac{DHP}{SHP} \quad (\text{Eq. 18})$$

- e) Eficiência do motor (η_m): eficiência entre o torque transmitido com o eixo o que o motor fornece.

$$n_m = \frac{SHP}{BHP} \quad (\text{Eq. 19})$$

Com isso, é possível obter a seguinte relação para a obtenção da potência do motor:

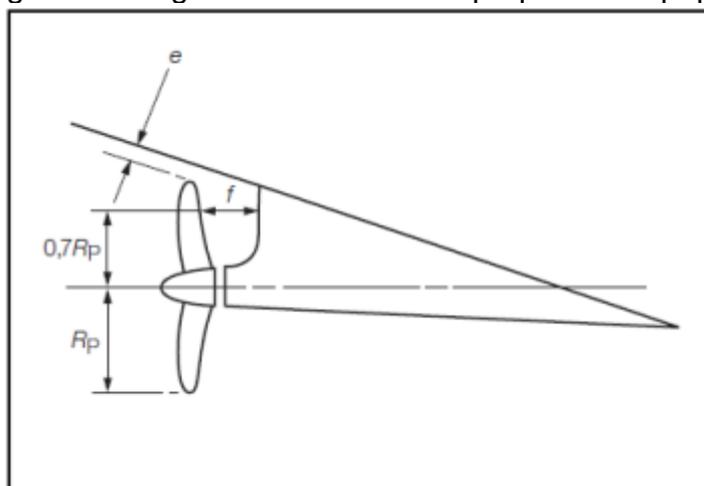
$$EHP = n_h n_{rr} n_0 n_s n_m BHP \quad (\text{Eq. 20})$$

O *BHP* ainda é corrigido com as margens de motor (~10% a mais de potência), uma margem de mar (~10% a mais de potência) e de rotação (~4%).

3.5 DIMENSIONAMENTO DO PROPULSOR

Para o cálculo do hélice mais eficiente, foi utilizado o procedimento descrito em Celis (2018b), o qual visa encontrar os valores de parâmetros do hélice ao comparar os valores de empuxo a serem gerados em uma determinada região de operação de velocidade. Antes de tudo, vale lembrar que a limitação mais importante e que deve ser primeiro considerada é a forma da região de popa onde o hélice será posicionado. Essa forma limitará o diâmetro do hélice. A Figura 4 ilustra regras da *Lloyd's Register* para definição do diâmetro do hélice. Lembrando que se busca a melhor eficiência e quanto maior o diâmetro, maior ela é. Mais detalhes estão apresentados em anexo.

Figura 4: Margens do diâmetro do propulsor na popa.



Fonte: Lloyd's Register, 2021.

Quanto ao número de pás, quanto menor mais eficiente será o hélice e os navios em geral e semelhantes geralmente são construídos com 4, 5 ou 6 pás. Por questões estruturais, não se pode usar um hélice com 2 ou 3 pás para navios submetidos a grandes cargas. Então, por navios semelhantes optou-se por um número de pás Z igual a 4.

A partir dos dados conhecidos requeridos pela embarcação (o empuxo e a velocidade de serviço), faz-se os cálculos dos coeficientes de interação casco propulsor e obtém-se a velocidade de avanço e o real empuxo querido pelo hélice. Por definição temos que as propriedades envolvidas nos cálculos do sistema propulsivo são postos em forma de coeficientes adimensionais, os quais estão na Tabela 5.

Tabela 5: Coeficientes propulsivos.

NOME	SÍMBOLO	EXPRESSÃO
Coeficiente de empuxo	K_T	$\frac{T}{\rho n^2 D^4}$
Coeficiente de torque	K_Q	$\frac{Q}{\rho n^2 D^5}$
Coeficiente de avanço	J	$\frac{V_A}{nD}$
Eficiência do propulsor em águas abertas	η_0	$\frac{J K_T}{2\pi K_Q}$

O propulsor será dimensionado pelos dados disponíveis para a série B da Wageningen (BERNITSAS; RAY; KINLEY, [s.d.]), uma série sistemática de propulsores que relaciona K_T e K_Q como função dos parâmetros enumerados. Um dos diagramas está apresentado no Anexo.

- Z : número de pás do propulsor;
- A_D/A_0 : razão entre a área desenvolvida e área do disco;
- P/D : razão entre o passo, ou seja, o quando o propulsor avança em uma rotação sobre o diâmetro;
- J : coeficiente de avanço;

Segue-se então os seguintes passos:

- Conhece-se os seguintes dados: resistência ao avanço, diâmetro do propulsor e velocidade de serviço.
- Calcula-se os coeficientes de esteira e de redução de empuxo.
- Calcula-se a velocidade de avanço e o empuxo requerido.
- Pelo critério de Keller para cavitação, obtém-se a razão de áreas mínima.
- Uma vez que as rotações não são conhecidas, manipula-se as expressões para K_T e J para obter a seguinte relação independente das rotações:

$$\frac{K_T}{J^2} = \frac{T}{\rho V_A^2 D^2} = C \quad (\text{Eq. 23})$$

- Seleciona uma razão P/D e, a partir dela, varia-se o J para obter diferentes valores de K_T e encontrar o ponto na qual $K_T/J^2 = C$.
- Obtém-se então o J correspondente e, com ele, as rotações necessárias do propulsor.
- Encontra-se o K_Q correspondente e com ele calcula-se η_0 .
- Repete esse processo para mais duas razões P/D .
- Plota-se os resultados na forma de um gráfico $\eta_0 \times J$, onde, para três pontos, tem-se uma função parabólica. Obtida essa função, encontra-se o J_{op} , aquele que maximiza a eficiência.
- Com isso, obtém-se o propulsor ótimo.

3.6 SELEÇÃO DO MOTOR

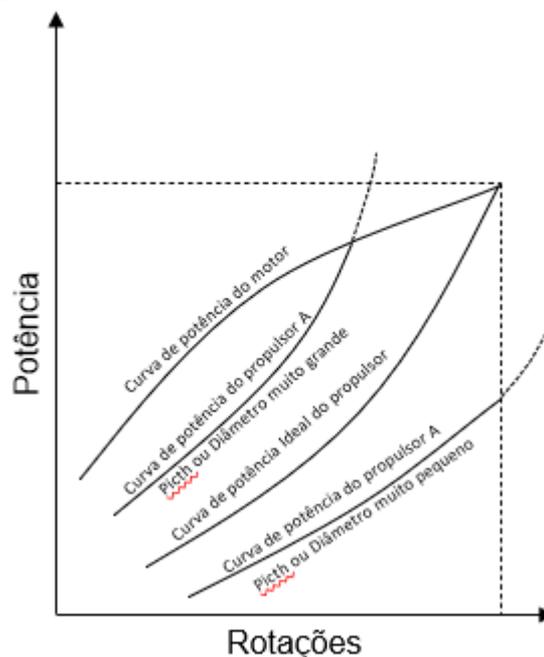
Obtido o EHP no passo anterior e as eficiências, consegue-se então o BHP . Com esse BHP , procura-se então em catálogos de fabricantes, um motor que possa fornecer a potência necessária, de acordo com as suas curvas de performance (Figura

5). Nesse sentido, tem-se preferência pelos motores *Wärtsilä* dada sua confiabilidade e boas soluções.

As curvas de performance apresentam as seguintes informações: a) curva de potência máxima, i.e., a potência máxima que o motor pode fornecer a uma dada rotação e b) a curva de potência do propulsor, uma curva teórica da potência necessária para poder ativar o propulsor (GERR, 1989). Neste trabalho vai ser feita a comparação de gasto de combustível e de emissões de GEE para um motor DF primeiro movido com HFO tradicional e depois com o HFO e o gás natural.

A região existente entre as curvas de potência é o quanto a mais de potência pode ser fornecida ao propulsor, tendo como limitante a potência máxima para aquela rotação. Isso é possível pois a quantidade de energia fornecida vai depender da quantidade de combustível sendo injetada no motor. Fornecer potência próxima à curva do propulsor vai garantir uma economia de combustível se comparado a operando na máxima potência para a mesma rotação. A Figura 5 ilustra as curvas de performance (GERR, 1988).

Figura 5: Curvas de performance do motor.



Fonte: Adaptado Gerr, 1988.

A Figura 5 ainda mostra como se comportam as curvas de potência do propulsor. Caso o propulsor possua um diâmetro ou passo elevado, será necessária muita potência para alimentar o propulsor, restringindo as rotações a menos do que o

máximo do motor e fazendo com que o motor seja sobrecarregado, fornecendo valores muito próximos da potência máxima. Se o diâmetro ou o passo forem pequenos, o motor pode facilmente chegar nas rotações máximas, no entanto muita pouca potência estaria chegando ao propulsor, prejudicando a operação.

Obtidas as curvas de performance, plota-se junto a elas a curva de potência da embarcação, tanto na condição de projeto como na condição de calado máximo. O propósito é comparar se o motor pode fornecer potência para propelar a embarcação sem estar sobrecarregado ou sendo subutilizado. Para garantir folga no uso do motor, considerou-se uma faixa entre 75% e 85% das rotações máximas para o ponto de operação.

Além disso, com a respectiva rotação do motor, seleciona-se a caixa de redução, se necessário, mais adequada para que o torque seja transmitido ao propulsor nas rotações necessárias. A caixa de redução é obtida a partir da taxa de redução calculada, i.e., a razão entre as rotações do motor e do propulsor. Além disso, é preciso conhecer o torque máximo fornecido pelo motor e que vai ser recebido pela caixa redutora. O torque pode ser obtido pela curva de potência a partir da seguinte expressão:

$$Q_{motor} = \frac{BHP}{\omega_{motor}} \quad (\text{Eq. 24})$$

Onde:

ω_{motor} é dado em *rad/s*, e o *BHP* é o máximo que motor pode fornecer em cada rotação.

3.7 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Uma vez selecionado um motor DF que atenda à demanda de potência calculada, é possível, através do catálogo do fabricante, obter os dados de consumo específico em função da sua carga de operação. Para o funcionamento do motor a gás natural, duas curvas são geradas: consumo específico de combustível piloto e de LNG. Para o caso de operação a óleo combustível pesado, há apenas a curva de consumo específico de bunker. Nesse sentido é importante conhecermos algumas propriedades físicas do LNG e do HFO, como as apresentadas nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6: Propriedades físicas do LNG.

Propriedades	Teor de metano	
	90 %	100%
Massa específica a - 160° C (Kg/m ³)	468,1	425,6
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	47,38	50,03
Ponto de fulgor (°C)	-188,0	-188,0
Teor de enxofre (% m/m)	0,005	0,005
Teor de água (%vol.vol.)	0,10	0,10

Fonte: Unitrove Consulting e Fluxys, 2023.

Tabela 7: Propriedades físicas do HFO.

Propriedades	Óleo Combustível Pesado (HFO)
Massa específica kg/m ³	950
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	41,83
Teor de enxofre %	3,5
Teor de água %	10,8

Fonte: *Global Combustion System*, 2023.

O fluxo mássico (\dot{m}) de combustível, em quilogramas por hora, a uma determinada capacidade de operação de um motor marítimo funcionando a gás, pode ser determinado através das seguintes equações.

$$\dot{m}_{LNG} = \frac{SGC \times P}{1000} \quad (\text{Eq. 25})$$

$$\dot{m}_{IFO} = \frac{SPOC \times P}{1000} \quad (\text{Eq. 26})$$

$$\dot{m}_{HFO} = \frac{SFC \times P}{1000} \quad (\text{Eq. 27})$$

Onde:

SGC: consumo específico de gás natural, em g/kWh;

SPOC: consumo específico de combustível piloto, em g/kWh;

SFC: consumo específico de óleo combustível do motor, em g/kWh;

P: potência de operação do motor, em kW.

Para quantificar a massa de combustível consumida pela embarcação durante uma viagem é necessária uma definição de autonomia do navio (A), que representa a distância máxima, em milhas náuticas, que uma embarcação poder permanecer navegando sem a necessidade de abastecimento de viveres ou combustível. Dessa forma, a massa de determinado combustível (m) consumida por viagem pode ser definida da seguinte forma:

$$m(\text{ton}) = 5,13 \times 10^{-4} \times \frac{\dot{m} \times A}{v_p} \quad (\text{Eq. 28})$$

Onde:

v_p é a velocidade de projeto, em m/s;

3.7 CUSTO

Para analisar o custo de funcionamento do Navio Princesa Isabel será examinado a diferença de custo de combustível LNG com relação ao HFO. Vale salientar que normalmente o preço do HFO é cotado em dólares por toneladas (US\$/ton). Já o LNG é cotado dólares por milhão de BTU (US\$/MMBTU). Já sobre o preço de comercialização dos combustíveis, sendo considerados commodities tem o preço em dólar, globalizado e varia diariamente.

Tabela 8: Preço médio de combustíveis marítimos.

Combustível	Preço em dólares por tonelada
HFO	648

LNG	790
-----	-----

Fonte: CNN, 2023.

Então o custo do combustível por viagem, em dólar (US\$), pode ser determinado para operação a gás natural e óleo pesado segundo as seguintes equações, respectivamente:

$$C = m_{LNG} \times p_{LNG} + m_{HFO} \times p_{HFO} \quad (\text{Eq. 29})$$

$$C = m_{HFO} \times p_{HFO} \quad (\text{Eq. 30})$$

3.9 BALANÇO ELÉTRICO

3.9.1 GRUPOS DE CONSUMO

É necessário conhecer os consumidores de carga para que se possa dimensionar a composição correta dos geradores e selecionar a forma mais eficaz de geração de energia. Os consumidores de cargas foram divididos em 11 grupos, cada grupo tem uma série de equipamentos que foram selecionados e dimensionados de maneira a determinar sua necessidade energética. Os 11 grupos estão listados a seguir.

- 1 – Praça de Máquinas (serviço contínuo);
- 2 – Praça de Máquinas (serviço intermitente);
- 3 – Praça de Máquinas (diversos);
- 4 – Ar condicionado / Ventilação / Aquecimento;
- 5 – Frigorífica de Provisões(equipamentos);
- 6 – Frigorífica de Carga(equipamentos);
- 7 – Máquinas de Convés;
- 8 – Cozinha / Copa;
- 9 – Lavanderia;

10 – Oficina;

11 – Iluminação;

12 – Equipamentos Náuticos e de Auxílio à Navegação

Geralmente é feito o cálculo para os consumos no mar (mínimo e normal), em manobra (atracação, operação etc), carga e descarga, no porto (em espera) e na situação de limpeza de tanques. Cada uma destas situações é única, i. e., não se está navegando e limpando tanques ao mesmo tempo, e, portanto, a coluna com o maior valor é a necessidade de geração de energia e é este valor que será utilizado na determinação dos geradores a bordo. Porém, normalmente se calcula a condição onde se faz uso contínuo dos equipamentos. Assim não será feito os cálculos para todas as condições possíveis, sendo suficiente os feitos a seguir. Ademais, todos os equipamentos são estimados com boa margem de segurança.

Neste trabalho será detalhada o cálculo de apenas alguns equipamentos dos principais sistemas de auxílio ao motor. São eles: sistema de combustível, sistema de HT, LT, água do mar, iluminação de emergência e climatização.

Para os cálculos das potências das bombas dos sistemas auxiliares do motor são usadas a equação 31, sendo usado os devidos fatores de conversão de unidades. A pressão de operação e a vazão são obtidas no guia do motor.

$$P = \frac{\rho \times g \times Q \times P_0}{\eta} \quad (\text{Eq. 31})$$

Onde:

ρ é a massa específica do combustível, em kg/m^3 ;

g é a aceleração da gravidade, em m/s^2 ;

Q é a vazão de combustível no motor dado pelo guia, em m^3/s ;

P_0 é a pressão efetiva no motor, em mca;

η é a eficiência.

Antes de ser injetado no motor, o combustível precisa passar por alguns processos. Entre eles está o pré-aquecimento, o aquecimento e a centrifugação. Para

o tratamento do combustível é usado um separador (centrífuga), na qual sua capacidade é calculado com a equação dada no guia de projetos do motor e é apresentada a seguir.

$$Q = \frac{P \times b \times 24[h]}{\rho \times t} \quad (\text{Eq. 32})$$

Onde:

P é a potência máxima do motor;

b é o consumo específico de combustível + uma margem de segurança de 15%;

t tempo diário de autolimpeza do separador (23,5h).

Para o sistema de iluminação é estimada uma demanda de 20 watts por pessoa. E, no caso, a tripulação total é de 27 pessoas.

3.10 CÁLCULO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

3.10.1 CO₂

A Tabela 8 mostra o fator de emissão de dióxido de carbono, em toneladas de CO₂ por toneladas de combustível, para diferentes tipos de combustíveis marítimos:

Tabela 9: Emissões de CO₂ para combustíveis navais.

Combustível	X_{CO_2} (t/t combustível)
HFO	3,114
MDO/MGO	3,205
LNG	2,750
GLP	3,000

Fonte: IMO, 2020.

Pode-se então definir o fator de emissão de CO₂, em g/kWh, para operação a gás e a óleo pesado, respectivamente, conforme as equações:

$$X_{CO_2} \left(\frac{g}{kWh} \right) = X_{CO_2}^{HFO} \times SPOC + X_{CO_2}^{LNG} \times SGC \quad (\text{Eq. 31})$$

Onde SPOC e SGC representam, respectivamente, o consumo específico de combustível piloto e de gás natural, em g/kWh.

$$X_{CO_2} \left(\frac{g}{kWh} \right) = X_{CO_2}^{HFO} \times SFC \quad (\text{Eq. 32})$$

Sendo SFC o consumo específico de óleo combustível pesado.

3.10.2 NO_x

A formação de NO_x é resultado da oxidação do nitrogênio molecular presente no ar de combustão e orgânico presente no combustível. O fator de emissão dos óxidos de nitrogênio varia conforme o combustível utilizado, mas também é muito influenciada pelo tipo de motor. Motores de dois tempos que operam a baixas rotações, geralmente, emitem uma quantidade maior de gases NO_x com relação aos motores de quatro tempos de média e alta rotação (Kristensen, 2015). A Tabela 9 mostra o fator de emissão de NO_x para diferentes tipos de combustível, em toneladas de NO_x por toneladas de combustível, aplicável a motores de baixa rotação.

Tabela 10: Emissões de NO_x para combustíveis navais.

Combustível	X_{NO_x} (t/t combustível)
HFO	0,078
MDO/MGO	0,074
LNG	0,008

Fonte: IMO, 2020.

Portanto, o fator de emissão de NO_x, em g/kWh, pode ser determinado, para operação a gás e a óleo pesado, respectivamente, conforme as seguintes equações:

$$X_{NO_x} \left(\frac{g}{kWh} \right) = X_{NO_x}^{HFO} \times SPOC + X_{NO_x}^{LNG} \times SGC \quad (\text{Eq. 33})$$

$$X_{NO_x} \left(\frac{g}{kWh} \right) = X_{NO_x}^{HFO} \times SFC \quad (\text{Eq. 34})$$

3.10.2 SO₂

Os óxidos do tipo SO_x derivam da parcela de enxofre presente no combustível que é oxidada na câmara de combustão, sendo os produtos da reação quase que totalmente constituídos por SO₂. O fator de emissão do dióxido de enxofre, em g/kWh, pode ser considerado proporcional à porcentagem em massa de enxofre do combustível e quantificada, para operação a gás e óleo pesado, respectivamente, segundo as equações abaixo (Kristensen, 2015):

$$X_{SO_2} = 0,021 \times (\%_S^{HFO} \times SPOC + \%_S^{LNG} \times SGC) \quad (\text{Eq. 35})$$

$$X_{SO_2} = 0,021 \times \%_S^{HFO} \times SFC \quad (\text{Eq. 36})$$

Onde, %_S a porcentagem em massa de enxofre, definida para o óleo pesado e o gás natural liquefeito.

3.10.3 Material particulado (PM)

Em relação a emissões de partículas (Kristensen, 2015), propôs uma equação baseada em análises estatísticas, relacionando o fator de emissão de PM, em g/kWh, em função da porcentagem em massa de enxofre do combustível, como segue abaixo:

$$X_{PM} = 0,26 + 0,081 \times \%_S + 0,103 \times \%_S^2 \quad (\text{Eq. 37})$$

No que se refere a operação a óleo pesado, a equação acima é suficiente para determinação do fator de emissão de PM do motor. Mas, no caso de operação a gás natural, como no motor DF, deve-se usar a expressão a seguir:

$$X_{PM} = \frac{X_{PM}^{LNG} \times SGC + X_{PM}^{HFO} \times SPOC}{SGC + SPOC} \quad (\text{Eq. 38})$$

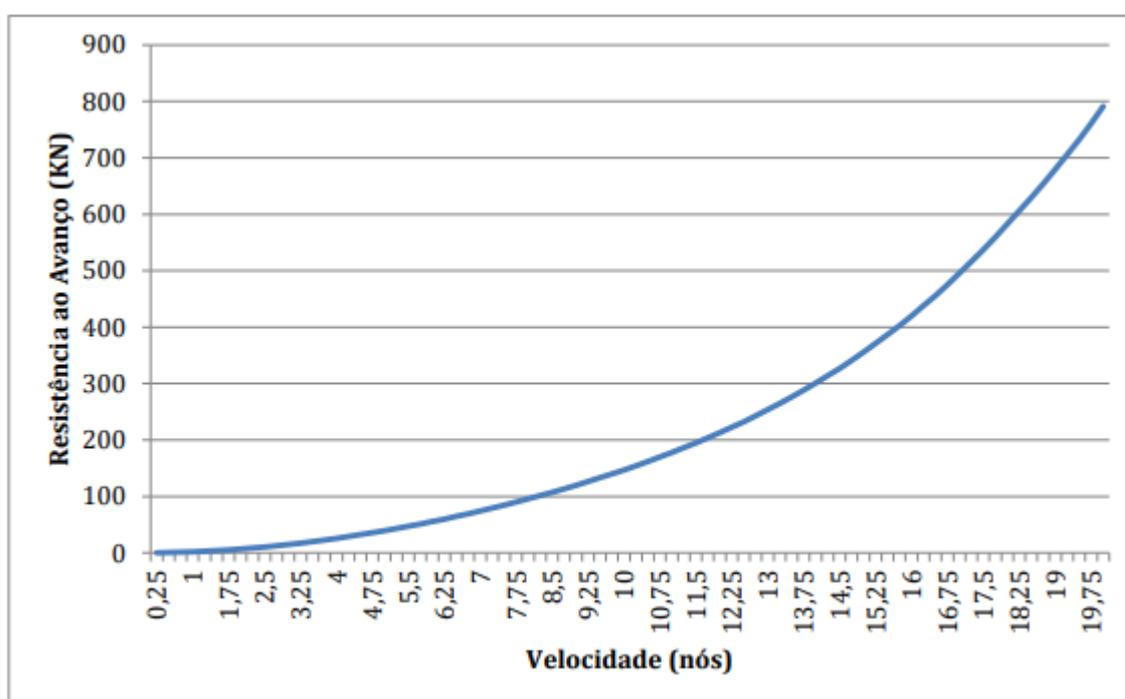
Onde os valores de X_{PM}^{LNG} e X_{PM}^{HFO} são obtidos através da equação 36.

4 RESULTADOS

4.1. SISTEMA PROPULSIVO

O teste de resistência ao avanço feito no *Maxsurf Resistance* usando o método de Holtrop para calcular a resistência total da embarcação na velocidade de serviço escolhida resultou no gráfico da Figura 6. Como ilustra a Tabela 10, o navio apresenta os parâmetros físicos em que o método se enquadra. A velocidade de serviço do Princesa Isabel é 16,7 nós e a sua respectiva resistência ao avanço obtida é de 475,33 kN.

Figura 6: Curva de resistência ao avanço em função da velocidade.



Fonte: O autor, 2023.

Tabela 11: Parâmetros da embarcação para o método de Holtrop

Parâmetro	Valor mínimo	Embarcação	Valor máximo
Coeficiente Prismático	0,55	0,71	0,85

Comprimento / Boca	3,9	9,26	15
Boca / Calado	2,1	2,24	4
Coefficiente de Froude	0,05	0,23	1

Fonte: O autor, 2023.

Em seguida foi calculado empuxo com os valores dos coeficientes de esteira e de empuxo obtidos, como é apresentado na Tabela 11.

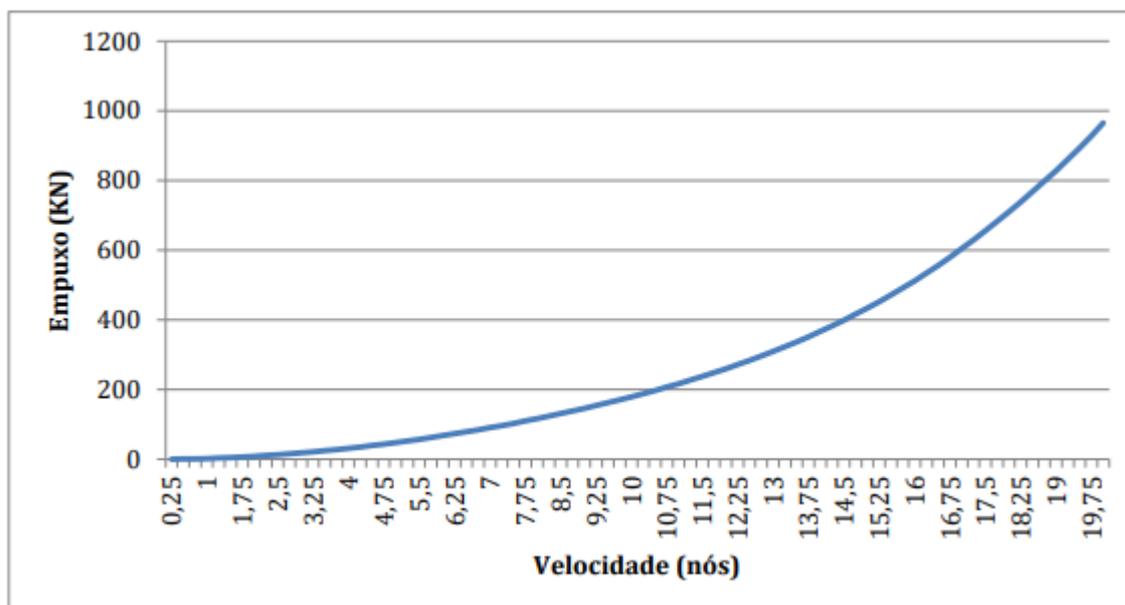
Tabela 12: Coeficientes da relação casco propulsor.

w	0,3
t	0,18
T	579,67 kN

Fonte: O autor, 2023.

Na Figura 7 é ilustrada a relação entre empuxo e velocidade de avanço.

Figura 7: relação entre empuxo e velocidade de avanço.



Fonte: O autor, 2023.

Foi a partir desse gráfico que se obteve o valor do empuxo para a velocidade de serviço. Por questão de segurança foi adicionado uma porcentagem de 20% de segurança ao valor do empuxo inicial. Assim, resultou o empuxo do propulsor deve ser de no mínimo 692 kN. Dessa forma, o EHP resultou em 5976 kW.

A seleção do propulsor ocasionou nos resultados apresentados na Tabela 13. Vale lembrar que a escolha é feita de acordo com as limitações geométricas da popa da embarcação e buscando a melhor eficiência dentro de todas as restrições existentes.

Tabela 13: Resultado da seleção do propulsor com melhor eficiência.

EHP	5976 kW
D	7 m
p/D	1
Z	4
A_e/A_0	0,63
n	68,94 rpm
k_t	0,19
k_q	0,03
η_0	0,62
Q	682,3 kN*m
DHP	4925,78 kW
BHP _f	6209 kW
n _f	71,7 rpm

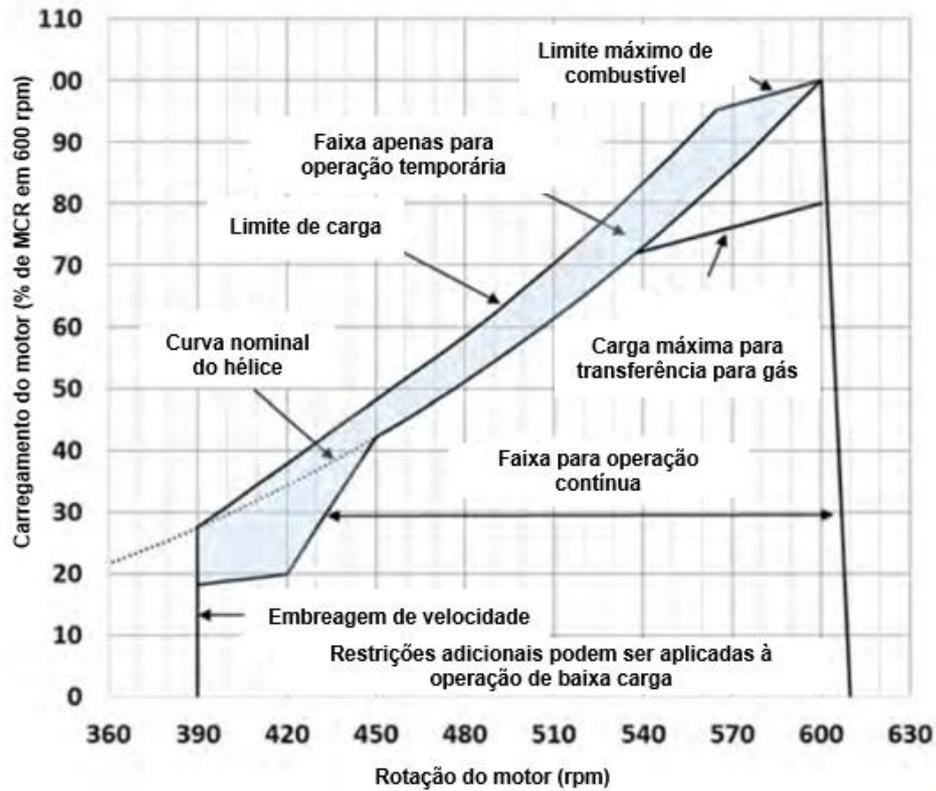
Fonte: O autor, 2023.

4.2. SELEÇÃO DOS MOTORES

4.2.1. MOTOR DF

Com os dados obtidos de potência requerida e da rotação do propulsor foi selecionado para motor principal o Wärtsilä 7L46DF (WARTSILA, 2022) com potência máxima de 8015 kW. Além disso, a faixa “ótima” de potência desse motor está entre 75% e 85% de sua capacidade máxima (como mostra a Figura 8). Como o propulsor demanda 6209 kW, isso corresponde a 77,5 % dessa potência e, dessa forma, está bem localizado no intervalo “ótimo” de operação.

Figura 8: Faixa ótima de operação do motor.



Fonte: Adaptado de Wartsila, 2023.

Na Tabela 14 são apresentadas algumas características relevantes do motor que são fornecidas pela fabricante.

Tabela 14: Dados do motor Wartsila 7L46DF.

Modelo	7L46DF
Potência	8075 kW
Potência por cilindro	1145 kW
Rotação	600 rpm
Número de cilindros	7
Disposição do cilindro	Longitudinal
Pressão efetiva principal	2,38 Mpa
Vel. Principal do pistão	11,6 m/s
Vazão de combustível para o motor	5,9...7 m ³ /h

Fonte: Wartsila, 2023.

As dimensões principais e demais informações secundárias sobre o motor estão no Anexo 1. Ademais, no que refere a rotação, os valores não condizem

exatamente com o necessário para o propulsor, nesse sentido existe a necessidade do uso de uma caixa de redução. Sabendo que o propulsor precisa de 72 rpm e que o motor está operando a 465 rpm, tem-se uma taxa de redução de 6,46. Assim, de acordo com as opções disponíveis no mercado escolheu-se uma da Wartsila redução de 95, apresentada no Anexo 2.

4.2.2 BALANÇO ELÉTRICO

Para bombas do sistema de combustível os valores de vazão e pressão de operação do motor usados nas equações mostradas na metodologia foram, respectivamente 5,9 m³/s (HFO), 7 m³/s (LNG) e 224,34 mca (100kPa). Também se definiu uma eficiência de 70 %. O resultado está na tabela 15 para o HFO e LNG.

Tabela 15: Potência da bomba e do compressor de combustível respectivamente.

P HFO	4,89	kW
P LNG	2,85	kW

Fonte: O autor, 2023.

O separador (centrífuga) de HFO consiste em um mecanismo usado para separar líquidos e partículas indesejados. Ele funciona na base da força centrífuga, que basicamente é gerada pela rotação do rotor em velocidade bastante alta.

De acordo com a equação 32 indicada na seção de metodologia, os cálculos indicaram uma vazão Q de 1,83 m³/h. Feito isso utilizou-se o catálogo da Alfa Laval para centrífugas de óleo, onde optou-se pelos equipamentos da série MAB que é usada em instalações marinhas em óleos de combustível e lubrificantes. A tabela apresenta as especificações da centrífuga MAB 206.

Tabela 16: Centrífuga de HFO MAB 206.

Especificações da centrífuga de óleo Alfa Laval MAB 206	
Vazão Máxima	10,6 m ³ /h
Peso	525kg
Potência	12 kW

Fonte: Alfa Laval, 2023.

As bombas de HT/LT são acopladas diretamente no motor, sendo dispensada necessidade de cálculo de demanda de potência. Já para o sistema de resfriamento e iluminação de emergência, com as estimativas apresentadas na metodologia, temos que a demanda de potência é de 5,4 kW. Dessa forma, somando todas as principais demandas de equipamentos faz-se necessário a geração de pelo menos 26 kW pelo motor auxiliar.

4.2.3 MOTOR AUXILIAR

Para nosso caso em questão são escolhidos duas unidades do grupo gerador 14 da Wartsila, com potência nominal 50Hz como motor 12V14. Ele tem capacidade de 675 kW de geração. Uma das unidades é para reserva em caso de problema com a primeira. A tabela apresenta suas principais especificações.

Tabela 17: Especificações da unidade de geração auxiliar.

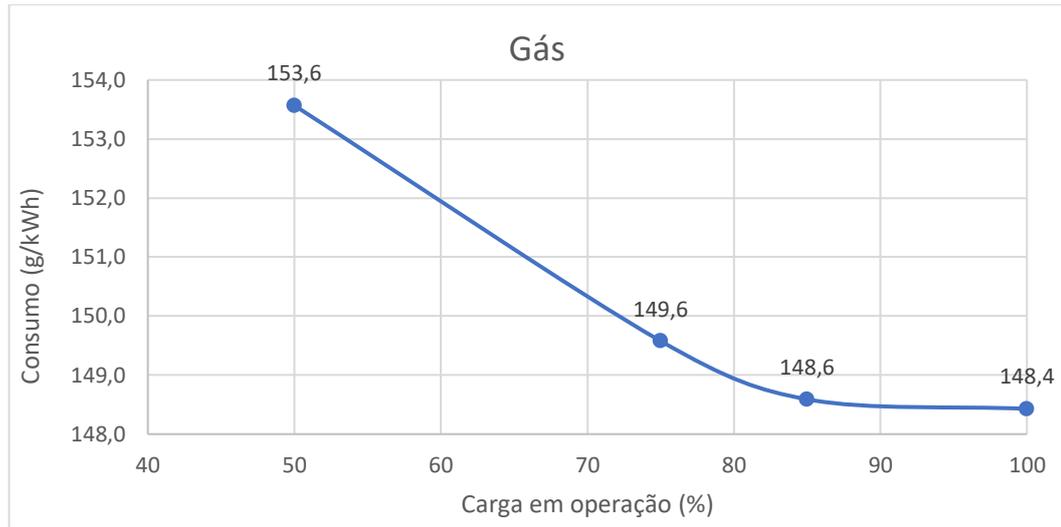
Modelo	Grupo gerador 14
Potência nominal	50 Hz
Tipo de motor	12V14
Geração	675 kW
Peso	5,5 ton

Fonte: Wartsila, 2023.

4.2.4 PREVISÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

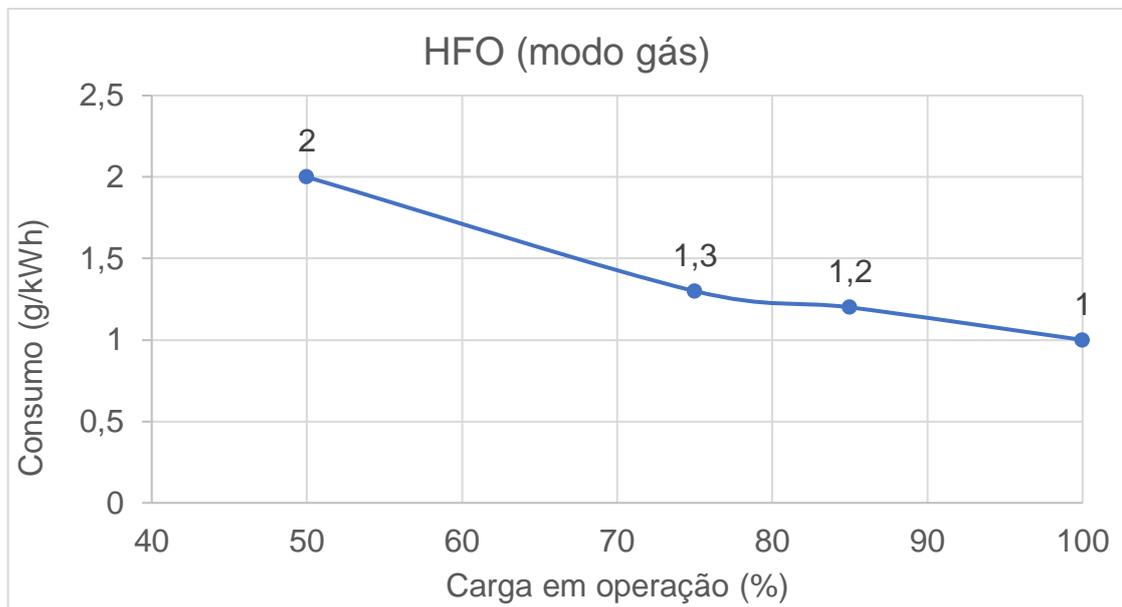
As figuras 9, 10 e 11 mostram as curvas de consumo específico de gás natural e óleo combustível pesado, para operação a gás, e óleo combustível pesado, para o caso de operação a HFO. Os valores adotados para o poder calorífico inferior (PCI) do óleo combustível pesado e gás foram, respectivamente, 42.700 e 50.000 kJ/kg. Ademais, assume-se que foi utilizado como referência para elaboração destas curvas gás natural com 100% de teor de metano. A parte do guia de projetos que contém os valores de consumo específico discriminados para diferentes capacidades de operação, obtido no website da fabricante, encontra-se no Anexo II deste projeto.

Figura 9: Consumo específico de Gás natural do motor para operação a gás.



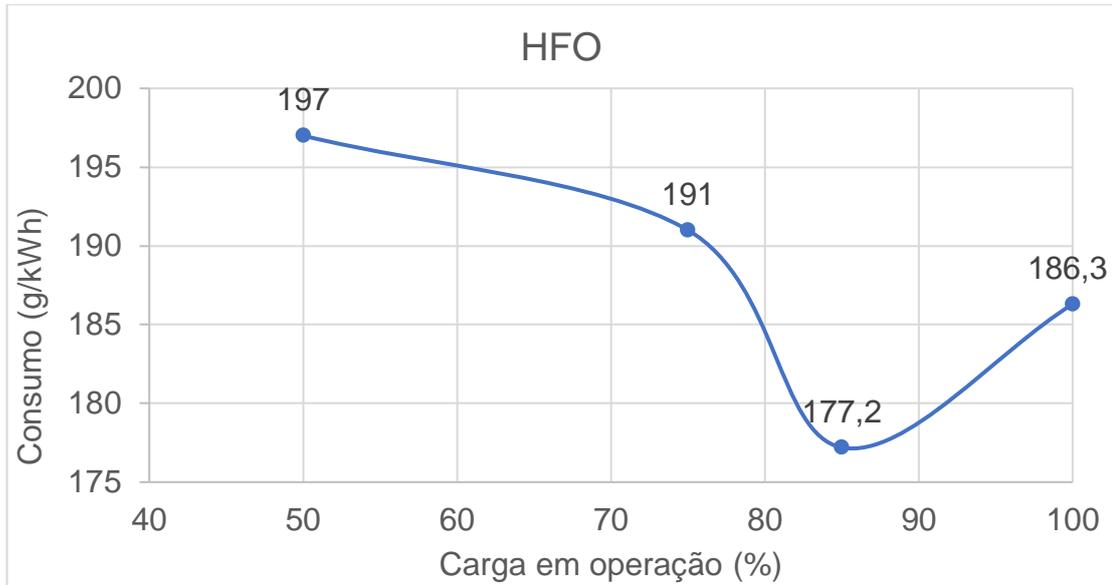
Fonte: Wartsila, 2023.

Figura 10: Consumo específico de óleo pesado do motor para operação a gás.



Fonte: Wartsila, 2023

Figura 11: Consumo específico de óleo pesado para operação a HFO.



Fonte: Wartsila, 2023.

O navio princesa Isabel possui autonomia de 1300 milhas náuticas. O consumo de combustível por viagem será estimado em função da autonomia para funcionamento a gás, de acordo com a seção da metodologia, através das equações 25 a 30. Será considerada a hipótese de navegação à velocidade constante V_p do navio, com o motor operando a uma potência de 6,2 MW equivalente a 77,5% da sua capacidade. Os valores de consumo específico de gás e óleo piloto do motor Wartsila 7L46DF para operação a 77,5% da capacidade no modo gás são respectivamente 149 g/kWh de gás e 1,3 g/kWh de HFO. Já para o funcionamento a HFO, o consumo específico de combustível para essa mesma capacidade equivale a 188 g/kWh.

Para a análise de custo do uso do gás natural como combustível, serão considerados o custo de combustível por viagem, calculado a partir das equações 24 e 25. Três cenários diferentes serão explorados: autonomia para funcionamento a gás de 1300 e 650 milhas náuticas (as últimas 650 percorridas com o motor operando a HFO). Será considerado também o cenário de operação com óleo combustível pesado para toda a viagem).

Tabela 18: Consumo e custo de combustível.

Parâmetro	Autonomia a gás (nm)		
	0	650	1300

Gás Consumido (ton)	-	35,83	71,65
HFO Consumido (ton)	85,45	42,73	0,63
Custo de combustível (US\$)	55414,35	56010,21	57012,62

Fonte: O autor, 2023.

Nota-se um aumento pequeno no custo de combustível por viagem com o aumento d utilização do gás natural como combustível principal. Para autonomia de 650 milhas foi calculada um aumento de 1,08%. Já para a autonomia de 1300 milhas o aumento foi de 2,9%. Nesse contexto, vale lembrar os aumentos astronômicos nos preços do gás natural decorrente da pandemia e principalmente da invasão Russa à Ucrânia chegando a aumentar em 4x os preços no pico da crise.

Sobre as emissões, com base nos gráficos de consumo específico do motor e na estrutura de cálculo descrita na metodologia, é possível gerar curvas de emissões de CO₂, SO₂, NO_x e PM para o funcionamento a gás e a óleo pesado para diferentes cargas de operação. Também serão quantificados os fatores de emissão de poluentes para o motor Wartsila 7L46DF tomando como valor de referência o consumo específico de combustível a 100% de carga equivalente, respectivamente, 1 g/kWh e 148,4 g/kWh de HFO e LNG. Para operação a HFO a uma mesma capacidade, o consumo específico de óleo pesado é de 186,3 g/kWh. Foi usado como referência os percentuais de 0,5% e 0,005% para o HFO e o LNG, respectivamente, como fator de emissão de enxofre. Dessa forma, com base nas equações 31 a 38 obtém-se os fatores de emissão a gás e a óleo pesado, conforme a tabela 16.

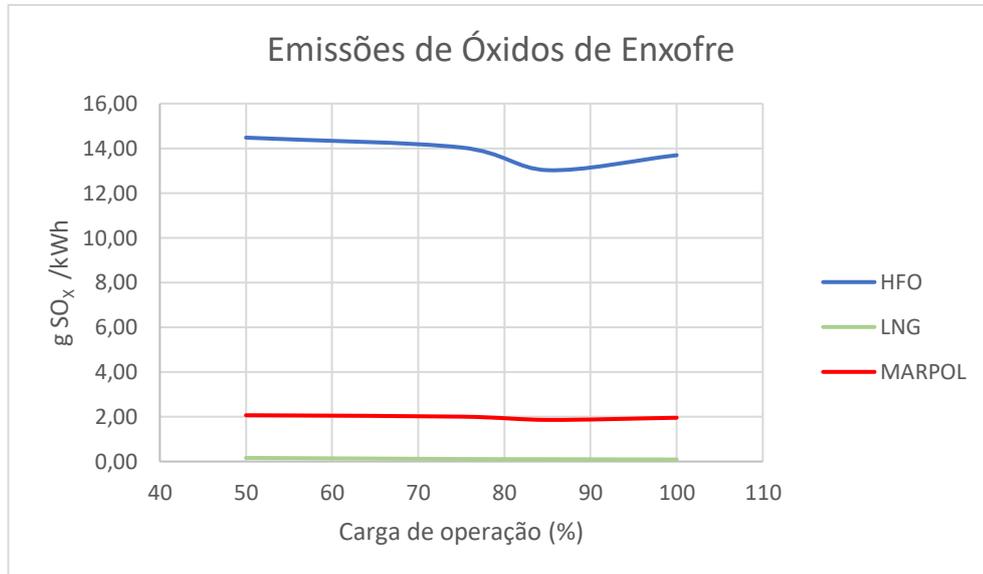
Tabela 19: Fatores de emissões de GEE dos combustíveis.

GEE (g/kWh)	HFO	LNG
CO ₂	580,14	411,29
NO _x	14,53	1,27
SO ₂	1,96	0,03
PM	0,33	0,10

Fonte: O autor, 2023.

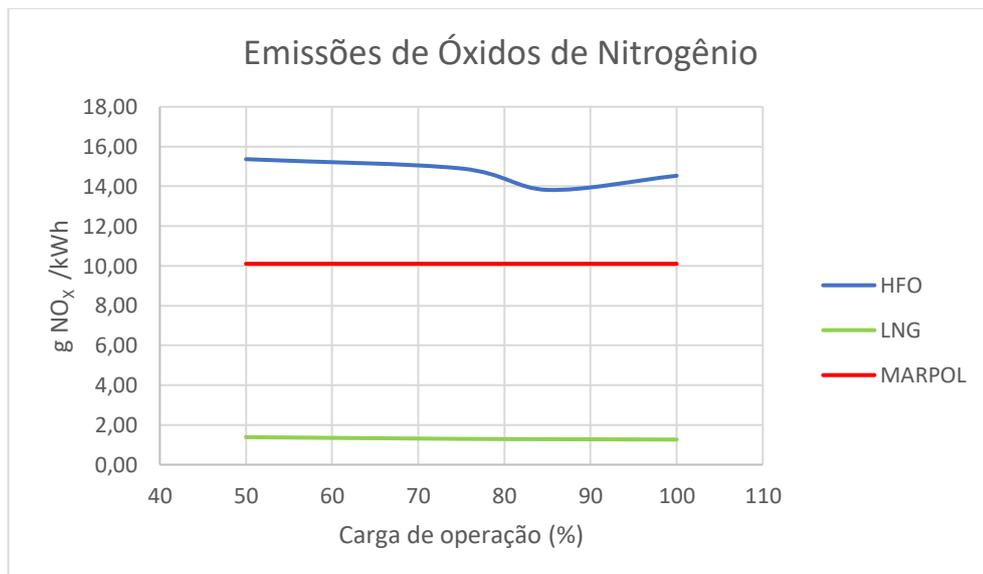
Os gráficos nas figuras 13 e 14 comparam as emissões de SO₂ e NO_x calculadas para a operação a gás do motor *Wartsila 7L46DF* com limites determinado pela IMO nas novas resoluções da MARPOL (IMO, 2020b).

Figura 12: Fator de emissão de SO₂ do motor Wartsila 7L46DF.



Fonte: O autor, 2023.

Figura 13: Fator de emissão de NO_x do motor Wartsila 7L46DF.



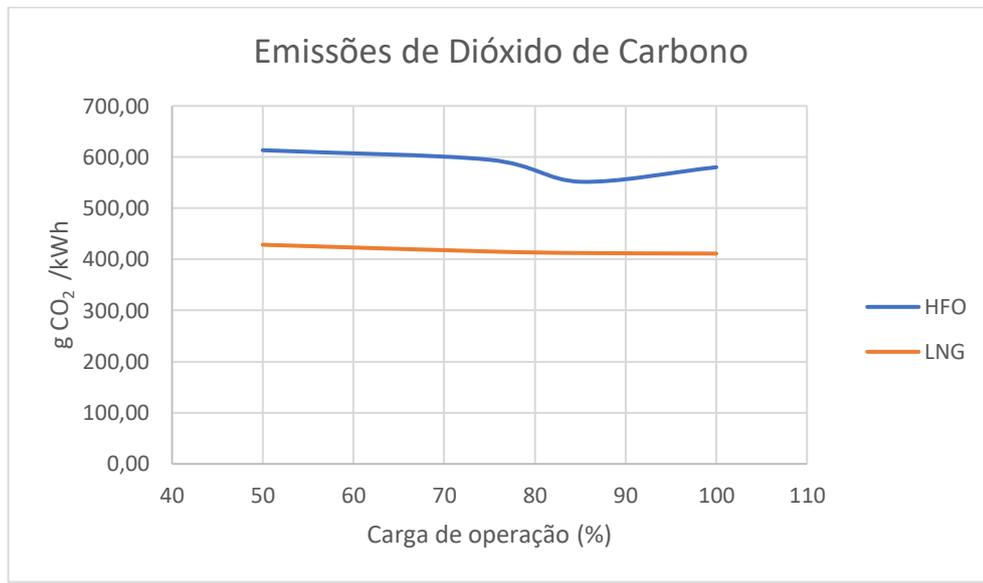
Fonte: O autor, 2023.

Percebe-se que ambos os fatores quando operando a HFO fica acima do determinado pela IMO, enquanto que usando LNG a situação muda e se está dentro dos limites estabelecidos. Assim, mostra-se o que era esperado em relação ao uso do

LNG como combustível alternativo aos anseios globais de redução de emissões de GEE no setor naval.

Na figura 15 são apresentados os fatores de emissões de CO₂ para a operação com HFO e com LNG.

Figura 14: Fator de emissão de CO₂ do motor Wartsila 7L46DF.



Fonte: O autor, 2023.

Como esperado, é possível constatar a redução significativa de emissões de dióxido de carbono. Os cálculos indicaram uma redução de aproximadamente 30% nas emissões. Valor bastante significativo principalmente considerando o alto consumo e em período médio de 20 anos de vida útil de uma embarcação.

5. CONCLUSÃO

A opção de propulsão com LNG para o caso estudado se mostrou bastante benéfica do ponto de vista ambiental. Os resultados mostraram significativa diminuição das emissões dos GEE, seja CO₂, NO_x, SO_x e material particulado em comparação com o óleo combustível pesado.

Na maioria dos casos verificou-se taxas abaixo dos limites estabelecidos pela IMO. Por exemplo, os NO_x chegando a no máximo 1,38 g/Kwh, bem abaixo do limite de 10,104 g/Kwh; os SO_x chegando a no máximo 0,16 g/kWh, também bastante abaixo dos 2,07 g/Kwh limites; já a emissão de dióxido de carbono também foi expressiva, chegando a 30%. Assim, para o motor DF é possível fazer misturas com uso de LNG e HFO com uma proporção de meio a meio, por exemplo, e ainda assim atender as normas regulatórias.

Com base na análise econômica realizada, conclui-se que a utilização de LNG é viável para a operação proposta para o navio Princesa Isabel. Foi observado um aumento pequeno no custo de combustível por viagem com o aumento de utilização do gás natural como combustível principal, chegando a um aumento de 2,9% para 1300 milhas. Normalmente, até o ano de 2018 o resultado provável seria uma diminuição significativa no custo, mas com os impactos da pandemia e também pela invasão Russa da Ucrânia houveram aumentos astronômicos nos preços do gás.

6. TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros podem ser realizados estudos com outras embarcações com autonomies e motores diferentes, por exemplo com navios que porta contêiner que navegam entre o Brasil e a China, ou entre o Brasil e a Europa. Nesses casos pode-se estudar outros motores DF de outras marcas e com outros arranjos, além de se detalhar mais ainda os consumidores do motor auxiliar.

Além disso, estão surgindo novas soluções de combustíveis, sejam eles biocombustíveis, amônia, hidrogênio e motores elétricos. São muito importantes estudos de caso com propulsões deste tipo para a avaliação ambiental e financeira de tais soluções, a fim de melhor prever as dimensões das reais mudanças. Nisso, pode envolver o custo com aquisição, manutenção e operação, bem como os possíveis prejuízos ou lucros com perdas ou ganhos de capacidade de carga.

REFERÊNCIAS

- ALFA LAVAL. Marine fuels in the low-sulphur era. 2020.
- ASARIOTIS, R. et al. **Review of Maritime Transport 2018**. 2018.
- BENTLEY. User Manual MAXSURF Resistance. [s.l.] Bentley Systems, 2018.
- BENGTSSON, S.; ANDERSSON, K.; FRIDELL, E. A comparative life cycle assessment of marine fuels: Liquefied natural gas and three other fossil fuels. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment**, v. 225, n. 2, p. 97–110, maio 2011.
- BERNITSAS, M. M.; RAY, D.; KINLEY, P. Kt, Kq and Efficiency curves for the Wageningen B-Series Propellers. **1981**, [s.d.].
- CARVALHO, F. et al. Biofuels for maritime transportation: A spatial, techno-economic, and logistic analysis in brazil, europe, south africa, and the usa. **Energies**, v. 14, n. 16, 2021.
- CELIS, M. ME 611 Hidrodinâmica do navio 2 - Interação Casco Propulsor. 2018a.
- CELIS, M. ME 611 Hidrodinâmica do navio 2 - Séries sistemáticas. 2018b
- EYRING, V. et al. **Emissions from international shipping: 2. Impact of future technologies on scenarios until 2050**. **Journal of Geophysical Research D: Atmospheres**, 16 set. 2005.
- FLUXYS. “Specific requirements for LNG at the delivery point of the zeebrugge LNG terminal.” Disponível em: <https://www.fluxys.com/belgium/en/services/Ingterminalling/~media/files/service_s/Ing%20terminalling/conditionsandtariffs/fluxys_specific%20requirements%20for%20Ing%20at%20the%20delivery%20point%20of%20the%20zeebrugge%20Ing%20terminal%20pdf.ashx>. Acesso em: 18dez. 2022.
- FORETICH, A. et al. Challenges and opportunities for alternative fuels in the maritime sector. **Maritime Transport Research**, v. 2, n. March, p. 27, 2021.
- GERR, D. The Propeller Handbook. [s.l.: s.n.
- HANSSON, J. et al. The potential role of ammonia as marine fuel-based on energy systems modeling and multi-criteria decision analysis. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 8, 1 abr. 2020.
- HENRIK BRAGGE; CHATREE CHANTHONGJAROEN. **The future fuels of marine engines**. [s.l.] CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2021.
- HOFFMAN, J. et al. **REVIEW OF MARITIME TRANSPORT 2021**. [s.l.] UNITED NATIONS, 2021.
- HOLTROP, J.; MENNEN, G. G. . An Approximate Power Prediction Method. **International Shipbuilding Progress**, v. 25, n. 335, 1982
- IMO. **Fourth IMO GHG Study 2020 Full Report**. [s.l.: s.n.].
- IMO. **Anexo IV da MARPOL 73/78 Regras para a Prevenção da Poluição do Ar Causada por Navios**. [s.l.: s.n.].
- ITTC. Full Scale Measurements, Speed and Power Trials, Analysis of Speed/Power Trial Data. ITTC - Recommended Procedures and Guidelines, p.11, 2005.

MANNEN, J. D. VAN; OOSSANEM, P. VAN; VORUS, W. S. Principles of Naval Architecture Second Revision. Jersey City: The Society of Naval Architects & Marine Engineers, 1988. v. II

MÜLLER-CASSERES, E. et al. Production of alternative marine fuels in Brazil: An integrated assessment perspective. **Energy**, v. 219, 2021a.

MÜLLER-CASSERES, E. et al. Production of alternative marine fuels in Brazil: An integrated assessment perspective. **Energy**, v. 219, 2021b.

NERHEIM, A. R.; ÆSØY, V.; HOLMESET, F. T. Hydrogen as a maritime fuel—can experiences with LNG be transferred to hydrogen systems? **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 7, 2021a.

NERHEIM, A. R.; ÆSØY, V.; HOLMESET, F. T. Hydrogen as a maritime fuel—can experiences with LNG be transferred to hydrogen systems? **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 7, 1 jul. 2021b.

REN, J.; LIANG, H. Measuring the sustainability of marine fuels: A fuzzy group multi-criteria decision making approach. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 54, p. 12–29, 2017.

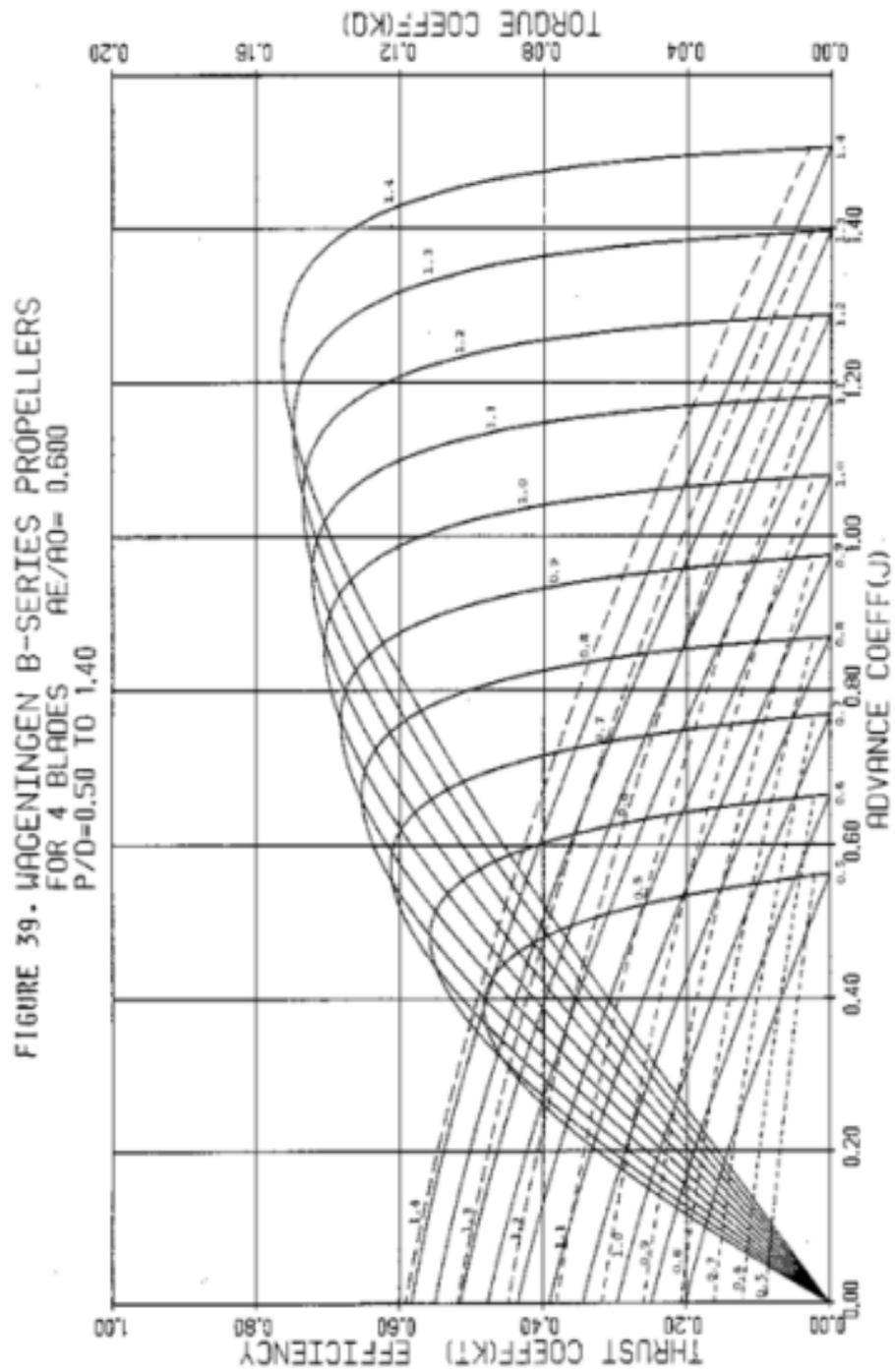
SELMA BENGTTSSON. **Life Cycle Assessment of Present and Future Marine Fuels**. Gothenburg: University of Technology, 2011.

TVEDTEN, I. Ø.; BAUER, S. Retrofitting towards a greener marine shipping future: Reassembling ship fuels and liquefied natural gas in Norway. **Energy Research and Social Science**, v. 86, 1 abr. 2022.

UNITROVE. "LNG density calculator". Disponível em: . Acesso em: 22 jul. 2018.

WARTSILA. **Engine Technical Information Product name Wärtsilä 6L46TS Application Type Marine main engine CP propeller, Marine main engine diesel-electric Feature IMO Tier II (Dsl)/Tier III (Gas)**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.wartsila.com/marine/engine-configurator>>.

ANEXO 1 – CURVAS DA WAGENINGEN PROPELLER SERIES B 4.6



Fonte: Bernitsas, 1981.

ANEXO 2 – DIMENSÕES E PESO DO MOTOR

Dimensions and weights

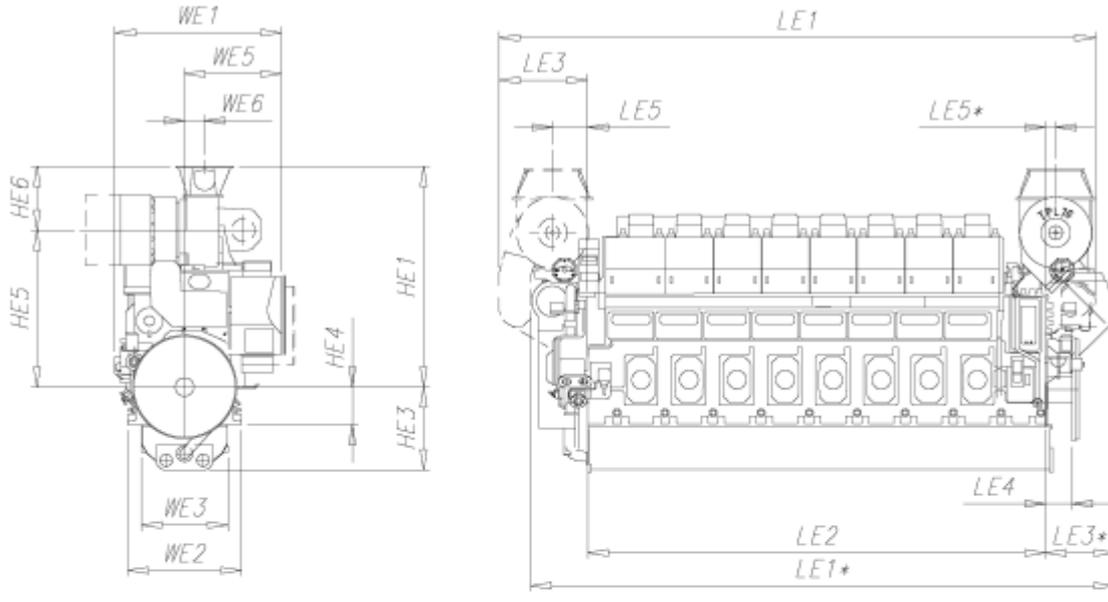


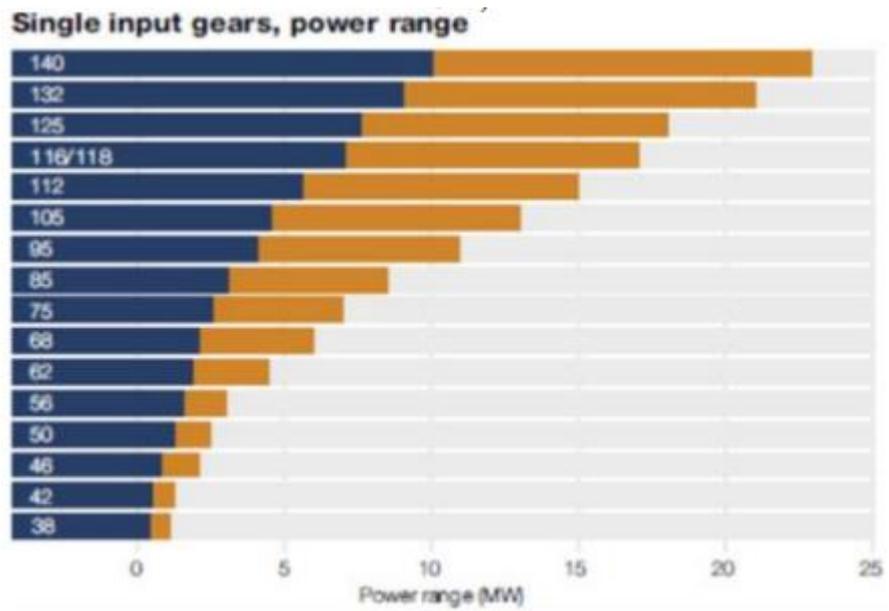
Fig 1-1 In-line engines (DAAE012051c)

Engine	LE1*	LE1	LE2	LE3*	LE3	LE4	LE5*	LE5	HE1	HE3
6L46F	8470	8620	6170	1320	1550	460	180	690	3500	1430
7L46F	9435	9440	6990	1465	1550	460	180	800	3800	1430
8L46F	10255	10260	7810	1465	1550	460	180	800	3800	1430
9L46F	11075	11080	8630	1465	1550	460	180	800	3800	1430

Engine	HE4	HE5	HE6	WE1	WE2	WE3	WE5	WE6	Weight [ton]
6L46F	650	2710	790	2905	1940	1480	1535	385	97
7L46F	650	2700	1100	3130	1940	1480	1760	340	113
8L46F	650	2700	1100	3130	1940	1480	1760	340	124
9L46F	650	2700	1100	3130	1940	1480	1760	340	140

Fonte: Wartsila, 2023.

ANEXO 3 – CAIXA DE REDUÇÃO 95



Fonte: Wartsila, 2023.