



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS DE RUSSAS**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**CATARINA NOGUEIRA BRAGA**

**PROPULSÃO HÍBRIDA EM EMPURRADORES FLUVIAIS: UM ESTUDO DE  
EFICIÊNCIA E SUSTENTABILIDADE**

**RUSSAS**

**2026**

CATARINA NOGUEIRA BRAGA

PROPULSÃO HÍBRIDA EM EMPURRADORES FLUVIAIS: UM ESTUDO DE  
EFICIÊNCIA E SUSTENTABILIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Campus Russas da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Silvia Teles Viana.

RUSSAS

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

B793p Braga, Catarina Nogueira.  
Propulsão híbrida em empurraadores fluviais : Um estudo de eficiência e sustentabilidade /  
Catarina Nogueira Braga. – 2026.  
114 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus  
de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2026.

Orientação: Profa. Dra. Silvia Teles Viana .

1. Propulsão híbrida. 2. Eficiência energética. 3. Sustentabilidade naval. I. Título.

CDD 620.1

---

CATARINA NOGUEIRA BRAGA

PROPULSÃO HÍBRIDA EM EMPURRADORES FLUVIAIS: UM ESTUDO DE  
EFICIÊNCIA E SUSTENTABILIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Campus Russas da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 22/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Silvia Teles Viana (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Caroliny Gomes de Oliveira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Eng.<sup>a</sup> Julianna Vulcão da Silva  
Indústria Naval do Ceará (INACE)

Aos meus pais, Gil e Carlos, e à minha irmã, Geovana, pelo amor e apoio incondicional. A cada pessoa que, de alguma forma, fez parte dessa caminhada, minha eterna gratidão.

## AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Silvia Teles Viana, por sua orientação não apenas neste TCC, mas também no projeto de extensão Mulheres de Aço, que me proporcionou alcançar lugares que nunca pensei que chegaria.

À Universidade Federal do Ceará pela oportunidade de formação.

Agradeço aos meus pais, Gildenora e Carlos Henrique, que foram e sempre serão o meu alicerce. À minha mãe, pelo amor incondicional, por nunca permitir que eu desistisse dos meus sonhos e por estar sempre presente para me ouvir nos momentos mais difíceis. Ao meu pai, por ter feito o possível e o impossível para me oferecer uma educação de qualidade e por me apoiar em cada etapa desta jornada. Não seria quem sou hoje sem a dedicação e o amor de vocês dois. Minha eterna gratidão.

Minha irmã, Geovana, esteve ao meu lado em todos os momentos.

Em memória dos meus avós paternos, Seu Manuel e Dona Geralda, que, mesmo não estando presentes fisicamente, sei que me acompanham de onde estiverem, orgulhosos por cada passo dado nesta caminhada. À minha avó materna Maria do Socorro, por seu carinho e presença desde o início, e à minha bisavó Tereza, pelos conselhos sábios e pelos terços rezados que, com fé e amor, iluminaram meu caminho e me deram força para seguir em frente.

Às minhas amigas Shirley e Thayrla, que estiveram comigo desde o primeiro semestre. Rimos, choramos, enfrentamos desafios e amadurecemos juntas. Graças a vocês, Russas se tornou um lugar mais leve, acolhedor e cheio de memórias que levarei para sempre comigo.

Aos meus colegas de estaleiro, Elder, Julianna, Ricardo, Thalita, Lincoln, Geysiellen e Aurélio, por me apoiarem, ajudarem e incentivarem a concluir este trabalho.

Por fim, a cada pessoa que, de alguma forma, esteve presente e contribuiu para a realização deste sonho, deixo aqui o meu mais sincero e profundo agradecimento. Esta conquista também é de vocês.

“A única forma de chegar ao impossível é acreditar que é possível.”

(Alice no País das Maravilhas)

## RESUMO

O transporte hidroviário é essencial na matriz logística do Brasil, especialmente por sua alta eficiência energética e baixos custos operacionais, sendo bastante utilizado para o escoamento de grãos, minerais e combustíveis entre as áreas de produção e os portos. Ainda assim, a frota nacional depende, em sua maior parte, de motores de combustão interna a óleo combustível pesado (HFO, do inglês *Heavy Fuel Oil*), cuja operação resulta na emissão significativa de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) e material particulado (MP). Essas emissões agravam os efeitos ambientais e climáticos, desafiando o setor naval a se alinhar às novas metas internacionais de descarbonização e aos progressos nas tecnologias limpas. Nesse contexto, a propulsão híbrida se apresenta como uma solução eficaz para reduzir o consumo de combustível e as emissões para a atmosfera, sem comprometer o desempenho das embarcações. Este trabalho apresenta um método de dimensionamento para um sistema de propulsão híbrido, focado em um empurrador fluvial, com base em informações de uma embarcação nacional. Três cenários foram analisados: o convencional usando HFO, um retrofit com motor elétrico auxiliar e HFO, e um sistema híbrido que combina óleo diesel marítimo (MGO do inglês *Marine Gas Oil*), com propulsão elétrica. A comparação revela, de forma evidente, uma redução no consumo de energia e nas emissões, principalmente em condições de operação de baixa potência e durante manobras, bem como ganhos notáveis em eficiência operacional. A incorporação dessa tecnologia ainda reforça a conformidade da frota com as normas ambientais atuais, aumenta a flexibilidade operacional e ajuda a diminuir os custos ao longo da vida útil da embarcação. Portanto, a hibridização dos sistemas de propulsão se estabelece como um eixo crucial na modernização da navegação interior brasileira, promovendo a eficiência energética, a inovação tecnológica e um compromisso com a sustentabilidade no setor naval.

**Palavras - chave:** propulsão híbrida; eficiência energética; sustentabilidade naval.

## ABSTRACT

Waterway transport is essential to Brazil's logistics matrix, especially due to its high energy efficiency and low operating costs, and is widely used to transport grains, minerals, and fuels between production areas and ports. Even so, the national fleet depends, for the most part, on heavy fuel oil (HFO) internal combustion engines, whose operation results in significant emissions of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), sulfur oxides (SO<sub>x</sub>), and particulate matter (PM). These emissions aggravate environmental and climatic effects, challenging the shipping industry to align itself with new international decarbonization goals and advances in clean technologies. In this context, hybrid propulsion presents itself as an effective solution to reduce fuel consumption and emissions into the atmosphere without compromising vessel performance. This paper presents a sizing method for a hybrid propulsion system, focused on a river pusher, based on information from a national vessel. Three scenarios were analyzed: the conventional one using HFO, a retrofit with an auxiliary electric motor and HFO, and a hybrid system that combines marine diesel oil (MGO) with electric propulsion. The comparison clearly reveals a reduction in energy consumption and emissions, especially in low-power operating conditions and during maneuvers, as well as notable gains in operational efficiency. The incorporation of this technology further reinforces the fleet's compliance with current environmental standards, increases operational flexibility, and helps to reduce costs over the vessel's lifetime. Therefore, the hybridization of propulsion systems is established as a crucial axis in the modernization of Brazilian inland navigation, promoting energy efficiency, technological innovation, and a commitment to sustainability in the naval sector.

**Keywords:** hybrid propulsion; energy efficiency; naval sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Características geométricas de uma embarcação .....	24
Figura 2 – Empurrador.....	25
Figura 3 – Planta da praça de máquinas do empurrador .....	26
Figura 4 – Ciclo de funcionamento de um motor Diesel de quatro tempos. ....	31
Figura 5 – Hélice de Passo Fixo (FPP) .....	34
Figura 6 – Azimutal.....	34
Figura 7 – Motor Wärtsilä 31 .....	36
Figura 8 – Processo de pré-aquecimento do HFO .....	40
Figura 9 – Conjunto típico de motor Diesel auxiliar e gerador síncrono .....	43
Figura 10 – Arquitetura elétrica híbrida simplificada com .....	48
Figura 11 – Sistema de propulsão híbrido paralelo. ....	50
Figura 12 – Sistema propulsão híbrido combinado .....	51
Figura 13 – Pacote híbrido de bateria de 12 MWh .....	54
Figura 14 – Brittany Ferries .....	55
Figura 15 – Áreas de Controle de Emissão (ECAs) vigentes no mundo .....	59
Figura 16 – Fluxograma da estratégia de abordagem do estudo .....	67
Figura 17 – Purificador de HFO e óleo lubrificante.....	69
Figura 18 – Disposição da praça de máquinas do empurrador LDC 6400 .....	70
Figura 19 – Descargas de gases.....	71
Figura 20 – Motor Wärtsilä 8L20 .....	76
Figura 21 – Caldeira .....	77
Figura 22 – Arranjo geral da linha de eixo. ....	78
Figura 23 – Arranjo geral dos propulsores e tubo Kort. ....	78
Figura 24 – Motor de alimentação dos geradores. ....	79
Figura 25 – Sistema de passagem do HFO aquecido .....	81
Figura 26 – Sistema de propulsão híbrida.....	94

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparativo de consumo de combustível .....	96
Gráfico 2 – Comparativo das emissões de CO <sub>2</sub> nos diferentes modos de operação	97
Gráfico 3 – Comparativo das emissões de NO <sub>x</sub> nos diferentes modos de operação ..	98
Gráfico 4 – Comparativo das emissões de SO <sub>x</sub> nos diferentes modos de operação...	98
Gráfico 5 – Comparativo das emissões de PM nos diferentes modos de operação ...	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo específico e emissões específicas do HFO .....	38
Tabela 2 – Limites de emissão de NO <sub>x</sub> para motores da Categoria I .....	57
Tabela 3 – Limites de emissão de NO <sub>x</sub> para motores da Categoria II .....	57
Tabela 4 – Limites de emissão de NO <sub>x</sub> para motores da Categoria III .....	58
Tabela 5 – Evolução dos limites máximos de teor de enxofre no óleo combustível ....	58
Tabela 6 – Anexos MARPOL. ....	61
Tabela 7 – Ferramentas de limites de poluentes .....	61
Tabela 8 – Dados operacionais da embarcação.....	74
Tabela 9 – Dimensões geométricas do empurrador. ....	75
Tabela 10 – Estrutura da embarcação.....	75
Tabela 11 – Parâmetros unidade propulsora. ....	77
Tabela 12 – Características físicas – químicas destes combustíveis .....	82
Tabela 13 – Fatores de emissão média por tipo de combustível.....	83
Tabela 14 – Gases poluentes do HFO.....	90
Tabela 15 – Cenários para suprir demanda motor elétrico .....	92
Tabela 16 – Cenários para suprir demanda motor híbrido.....	93

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	American Bureau Of Shipping
ATS	Automatic Transfer Switches
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CH <sub>4</sub>	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CPP	Hélice de Passo Controlável
ECAs	Emission Control Areas
ECMS	Equivalent Consumption Minimization Strategy
EEDI	Energy Efficiency Design Index
EEOI	Energy Efficiency Operational Indicator
EGR	Recirculação de Gases de Exaustão
EMS	Energy Management System
FPP	Hélice de Passo Fixo
GEE	Gases de Efeito Estufa
GNL	Gás Natural Liquefeito
HFO	Heavy Fuel Oil
IMO	International Maritime Organization
IPCC	Intergovernmental Panel dno Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
LOA	Length Overall
MARPOL	International Convention For The Prevention Of Pollution From Ships
MCR	Potência Contínua Máxima
MDL	Mecanismo De Desenvolvimento Limpo
MGO	Marine Gas Oil
NO <sub>2</sub>	Dióxido De Nitrogênio
NO <sub>x</sub>	Óxidos De Nitrogênio
PA	Pará
PM	Material Particulado

PMS	Power Management System
PTO	Power Take Off
PTI	Power Take In
SCR	Redução Catalítica Seletiva
SEEMP	Ship Energy Efficiency Management Plan
SFC	Specific Fuel Consumption
SFOC	Specific Fuel Oil Consumption
SO <sub>2</sub>	Dióxido De Enxofre
SO <sub>x</sub>	Óxidos De Enxofre
VOC	Compostos Orgânicos Voláteis

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°	Grau
°C	Graus Celsius
ekW	Quilowatt Elérico
g	Gramas
g/kWh	Gramas por Quilowatt-Hora
Hz	Hertz
kJ/kg	Quilojoule por Quilograma
kg	Quilograma
kg CO <sub>2</sub> /kg	Quilograma de CO <sub>2</sub> por Quilograma de Combustível
kg/m <sup>3</sup>	Quilograma por Metro Cúbico
kg/ano	Quilograma por Ano
kW	Quilowatt
K	Kelvin
m	Metro
MPa	Megapascal
MWh	Megawatt-Hora
n	Rotação Nominal Dos Motores
psi	Libra por Polegada Quadrada
rpm	Rotações por Minuto
t	Tonelada
US\$	Dólar Americano

## SUMÁRIO

1.	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	19
1.1	<b>Organização do trabalho</b> .....	20
2.	<b>OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS</b> .....	21
2.1	<b>Objetivo geral</b> .....	21
2.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	21
2.3	<b>Justificativas</b> .....	21
3.	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	23
3.1	<b>Arte naval aplicada a empurradores</b> .....	23
3.1.1	<b>Casco</b> .....	23
3.1.2	<b>Convés e superestrutura</b> .....	25
3.1.3	<b>Praça de máquinas</b> .....	25
3.2	<b>Navegação interior e empurradores fluviais</b> .....	27
3.2.1	<b>Histórico e importância do transporte hidroviário no Brasil</b> .....	27
3.2.2	<b>Características operacionais e construtivas de embarcações do tipo empurrador</b> .....	28
3.2.3	<b>Aplicações típicas e desafios logísticos da navegação interior</b> .....	29
3.3	<b>Sistemas de propulsão naval convencionais</b> .....	30
3.3.1	<b>Princípios de funcionamento dos motores a combustão ciclo Diesel</b> ..	30
3.3.2	<b>Motores de médio e grande porte em embarcações fluviais</b> .....	31
3.3.3	<b>Tipos de propulsores e suas aplicações</b> .....	33
3.3.4	<b>Eficiência energética e consumo específico dos motores marítimos</b> ...	35
3.4	<b>Combustíveis marítimos: HFO e MGO</b> .....	37
3.4.1	<b>Propriedades físico-químicas do HFO (Heavy Fuel Oil)</b> .....	37
3.4.2	<b>Necessidade de pré-aquecimento e sistemas auxiliares (caldeiras)</b> .....	39
3.4.3	<b>Características do MGO (Marine Gas Oil) e sua aplicação em geradores</b> .....	40
3.5	<b>Sistemas de geração de energia elétrica em embarcações</b> .....	41
3.5.1	<b>Tipos de geradores e motores Diesel auxiliares</b> .....	42
3.5.2	<b>Funções dos grupos geradores principais e de emergência</b> .....	44
3.5.3	<b>Distribuição elétrica de bordo e apoio a sistemas críticos e habitabilidade</b> .....	45

3.5.4	<i>Dimensionamento do sistema de geração de energia para propulsão híbrida</i> .....	47
3.6	<i>Propulsão híbrida em embarcações</i> .....	48
3.6.1	<i>Conceito de sistemas híbridos navais: série, paralelo e combinado</i> ....	49
3.6.2	<i>Vantagens operacionais e ambientais da hibridização</i> .....	51
3.6.3	<i>Tecnologias envolvidas: motores elétricos, inversores, baterias de íon-lítio</i> .....	52
3.6.4	<i>Aplicações em embarcações fluviais: estudos de caso e tendências tecnológicas</i> .....	53
3.7	<i>Emissões atmosféricas na navegação</i> .....	55
3.7.1	<i>Principais poluentes emitidos por motores marítimos: CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, MP</i> .....	55
3.7.2	<i>Fatores de emissão conforme IMO (2020) e IPCC (2006)</i> .....	56
3.7.3	<i>Fórmulas e coeficientes para cálculo de emissões</i> .....	60
3.7.4	<i>Normas internacionais de controle de emissões no setor marítimo</i> ....	60
3.8	<i>Sustentabilidade e descarbonização no transporte aquaviário</i> .....	62
3.8.1	<i>Créditos de carbono como instrumento de mitigação no setor naval</i> ...	62
3.8.2	<i>Evolução tecnológica e perspectivas futuras</i> .....	63
4.	<b>METODOLOGIA</b> .....	65
4.1	<b>Tipo de Pesquisa</b> .....	65
4.2	<b>Estratégia de abordagem</b> .....	66
4.3	<b>Descrição da configuração atual da embarcação</b> .....	68
4.4	<b>Coleta de dados</b> .....	72
4.5	<b>Parâmetros técnicos considerados</b> .....	73
4.5.1	<i>Dados operacionais da embarcação</i> .....	74
4.5.2	<i>Características geométricas e estruturais</i> .....	74
4.5.3	<i>Sistema de propulsão principal</i> .....	76
4.5.4	<i>Sistema de geração de energia elétrica</i> .....	79
4.5.5	<i>Características dos combustíveis utilizados</i> .....	80
4.5.6	<i>Eficiência energética e consumo específico</i> .....	82
4.5.7	<i>Fatores de emissão de gases</i> .....	83
4.5.8	<i>Parâmetros para configuração híbrida (estimativa)</i> .....	84
4.6	<b>Ferramentas e referenciais normativos</b> .....	85
4.7	<b>Limitações do estudo</b> .....	86

<b>5.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>88</b>
<b>5.1</b>	<b>Avaliação energética da configuração atual .....</b>	<b>88</b>
<b>5.2</b>	<b>Proposta de sistema híbrido com motor elétrico na linha de eixo.....</b>	<b>90</b>
<b>5.3</b>	<b>Dimensionamento do sistema híbrido .....</b>	<b>92</b>
<b>5.4</b>	<b>Comparativo de desempenho: convencional x híbrido .....</b>	<b>95</b>
<b>5.5</b>	<b>Considerações sobre implementação .....</b>	<b>100</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>103</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>105</b>
	<b>APÊNDICE A – PLANILHA DE CÁLCULO DOS GASES MODELO HFO</b>	
	<b>CONVENCIONAL.....</b>	<b>110</b>
	<b>APÊNDICE B – PLANILHA DE CÁLCULO DOS GASES MODELO</b>	
	<b>HÍBRIDO COM HFO.....</b>	<b>111</b>
	<b>APÊNDICE C – PLANILHA DE CÁLCULO DOS GASES MODELO</b>	
	<b>HÍBRIDO COM MGO.....</b>	<b>112</b>
	<b>ANEXO A – SFOC DO HFO .....</b>	<b>113</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O transporte hidroviário tem papel estratégico na matriz logística brasileira, destacando-se pela eficiência energética e pelo baixo custo operacional. Responsável pelo escoamento de grãos, minérios e combustíveis, esse modal é essencial para a integração econômica e territorial do país. No entanto, a frota fluvial nacional ainda depende majoritariamente de motores a combustão interna do ciclo diesel, que emitem grandes quantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), enxofre (SO<sub>x</sub>) e material particulado (MP), intensificando a poluição atmosférica e as mudanças climáticas.

Diante desse cenário, a crescente preocupação ambiental e as regulamentações impostas pela Organização Marítima Internacional (IMO do inglês *International Maritime Organization*) e pela Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL do inglês *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*) têm impulsionado o setor naval a buscar alternativas mais limpas e eficientes.

Como resposta a essas exigências, os sistemas de propulsão híbrida aplicados a empurradores fluviais apresentam-se como uma alternativa promissora para o aumento da eficiência energética e a redução das emissões. A hibridização consiste na combinação de motores de combustão interna com sistemas elétricos, possibilitando melhor adequação do sistema propulsivo a regimes de carga variável, característicos da navegação interior, sem comprometer o desempenho operacional das embarcações.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral dimensionar e avaliar, de forma teórica, um sistema de propulsão híbrido para um empurrador fluvial, baseado no arranjo construtivo de uma embarcação nacional. Propõe-se o desenvolvimento e a avaliação de uma configuração híbrida, de forma teórica, que permita comparar o desempenho energético e ambiental em relação ao sistema convencional, identificando benefícios e limitações dessa tecnologia na navegação interior.

Para atender aos objetivos propostos, optou-se por um delineamento metodológico aplicado, com integração de análises quantitativas e qualitativas, em caráter exploratório e descritivo, configurando um estudo de caso técnico. Esse tipo de condução é recomendado quando se busca responder a demandas práticas e específicas do contexto analisado, como a adoção de propulsão híbrida na navegação fluvial (Gil, 2017).

Para tanto, combina-se pesquisa bibliográfica e documental, fundamentada em normas técnicas da IMO e da Organização Internacional de Normalização (ISO do inglês *International Organization for Standardization*), com a análise de dados reais da embarcação estudada. Por fim, utilizam-se métodos de cálculo energético e ferramentas computacionais (Microsoft Excel) para estimar o consumo específico e as emissões em diferentes cenários.

A escolha do tema justifica-se pela relevância do transporte hidroviário para o desenvolvimento logístico nacional e pela necessidade crescente de incorporar soluções sustentáveis ao setor naval. O desenvolvimento de sistemas de propulsão híbrida representa um avanço técnico importante para a transição energética e para o atendimento das metas de descarbonização estabelecidas por organismos internacionais, além de oferecer subsídios técnicos aplicáveis a projetos de retrofit e novas construções, contribuindo para a modernização, a sustentabilidade e a inovação tecnológica da engenharia naval e mecânica brasileira.

## **1.1 Organização do trabalho**

O trabalho está estruturado em seis capítulos: o primeiro apresenta a introdução; o segundo, os objetivos; o terceiro, a fundamentação teórica; o quarto, a metodologia; o quinto, a apresentação e discussão dos resultados; e o sexto, as conclusões e recomendações.

## **2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS**

Este capítulo apresenta os objetivos que orientam o desenvolvimento do trabalho, divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

### **2.1 Objetivo geral**

Dimensionar e avaliar, de forma teórica, um sistema de propulsão híbrido aplicado a um empurrador fluvial, com base no arranjo construtivo de uma embarcação nacional, comparando seu desempenho energético e ambiental em relação ao sistema convencional e identificando seus benefícios e limitações no contexto da navegação interior.

### **2.2 Objetivos específicos**

Para viabilizar o desenvolvimento do presente trabalho, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Levantar e caracterizar a configuração atual da embarcação, considerando motores, consumo energético e perfil operacional.
- Estimar o consumo de combustível e as emissões atmosféricas associadas ao sistema de propulsão convencional.
- Dimensionar uma configuração de sistema de propulsão híbrido aplicada ao empurrador fluvial.
- Verificar a viabilidade técnica e operacional do sistema proposto, observando suas limitações e possibilidades de aplicação futura.

### **2.3 Justificativas**

A crescente preocupação com os impactos ambientais associados às emissões de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) e material particulado (MP), aliada ao avanço das exigências regulatórias no setor naval, tem intensificado a busca por soluções tecnológicas mais eficientes e sustentáveis na navegação interior. Nesse contexto, a propulsão híbrida apresenta-se como uma

alternativa capaz de reduzir o consumo de combustíveis fósseis e as emissões atmosféricas, especialmente em embarcações que operam sob regimes de carga variável, como os empurradores fluviais.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

O setor naval tem vivenciado transformações significativas nas últimas décadas, impulsionado por avanços tecnológicos e pela crescente demanda por soluções mais sustentáveis e eficientes. Nesse contexto, os sistemas de propulsão híbrida vêm ganhando destaque como uma alternativa promissora à propulsão convencional, especialmente em embarcações que operam em ambientes fluviais, como os empurradores.

O presente capítulo tem como objetivo apresentar os principais fundamentos teóricos que embasam o dimensionamento de um sistema de propulsão híbrido para empurradores. Para isso, serão abordados, inicialmente, os marcos históricos da evolução dos sistemas de propulsão marítima, seguidos pelos princípios de arquitetura naval aplicados às embarcações fluviais, os desafios ambientais enfrentados pelo setor e, por fim, os avanços tecnológicos recentes nos sistemas de propulsão híbridos.

Essa revisão busca fornecer a base técnica e conceitual necessária para justificar as decisões de projeto e evidenciar a relevância da proposta do sistema híbrido frente aos requisitos operacionais e ambientais atuais.

#### **3.1 Arte naval aplicada a empurradores**

Empurradores fluviais são embarcações projetadas para realizar o reboque ou empurrar barças, operando predominantemente em rios e hidrovias interiores. Sua arquitetura naval é desenvolvida de forma a maximizar a força de tração, a manobrabilidade e a resistência estrutural, considerando as particularidades operacionais desses ambientes, como baixa profundidade e elevada variação hidrodinâmica. A compreensão de seus principais elementos estruturais e funcionais é fundamental para o adequado dimensionamento de sistemas de propulsão aplicados a esse tipo de embarcação (Tucci, 1999).

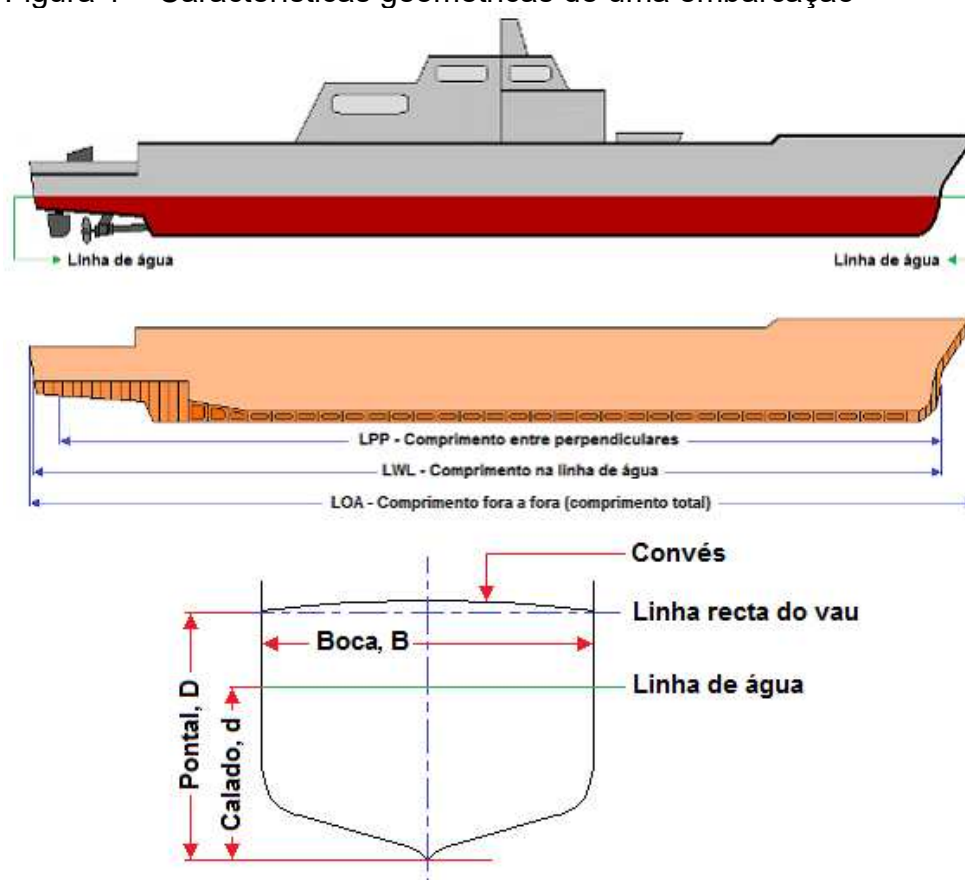
##### **3.1.1 Casco**

O casco pode ser entendido como o corpo estrutural da embarcação, excluindo-se elementos como mastreação, aparelhos acessórios e demais arranjos externos. De

modo geral, sua geometria não segue uma forma regular, sendo caracterizada principalmente pela presença de um plano de simetria longitudinal, conhecido como plano diametral, associado ao eixo da quilha. A definição adequada da forma do casco é fundamental para o desempenho náutico da embarcação, pois influencia diretamente a resistência ao avanço, a manobrabilidade e a estabilidade enquanto plataforma flutuante (Fonseca, 2002).

As principais medidas associadas ao casco são: calado (parte submersa da embarcação), boca (largura máxima), pontal (altura entre a quilha e o convés) e comprimento total (LOA do inglês *Length Overall*). A linha d'água, por sua vez, marca o limite entre a parte submersa e a parte visível do casco. O formato e as dimensões do casco influenciam diretamente na eficiência do sistema de propulsão e no consumo de energia, sendo especialmente importantes em projetos com propulsão híbrida, que exigem boa distribuição de peso e espaço interno adequado. Para esquematizar, a Figura 1 ilustra características geométricas de uma embarcação.

Figura 1 – Características geométricas de uma embarcação



Fonte: Principais características dos navios.

### 3.1.2 Convés e superestrutura

Os pavimentos de uma embarcação são denominados convéses, sendo o convés principal aquele localizado na posição mais elevada com função estanque, responsável por fechar o casco na parte superior e assegurar sua integridade contra a entrada de água. Apesar da presença de aberturas funcionais, como escotilhas, agulheiros e passagens técnicas, esses elementos são concebidos para preservar a estanqueidade quando corretamente vedados. Acima do convés principal desenvolve-se a superestrutura, que pode ser denominada casario quando apresenta dimensões reduzidas, e que abriga, em empurradores fluviais, os espaços de comando, navegação, alojamentos e apoio operacional, sendo projetada de modo a garantir visibilidade adequada e segurança durante as manobras (Rodrigues, 2013).

Em embarcações do tipo empurrador a superestrutura, tipicamente posicionada no centro. A Figura 2 apresenta a vista externa de um empurrador, na qual é possível identificar a superestrutura (branco) e o convés (vermelho).

Figura 2 – Empurrador.



Fonte: YouTube (2022).

### 3.1.3 Praça de máquinas

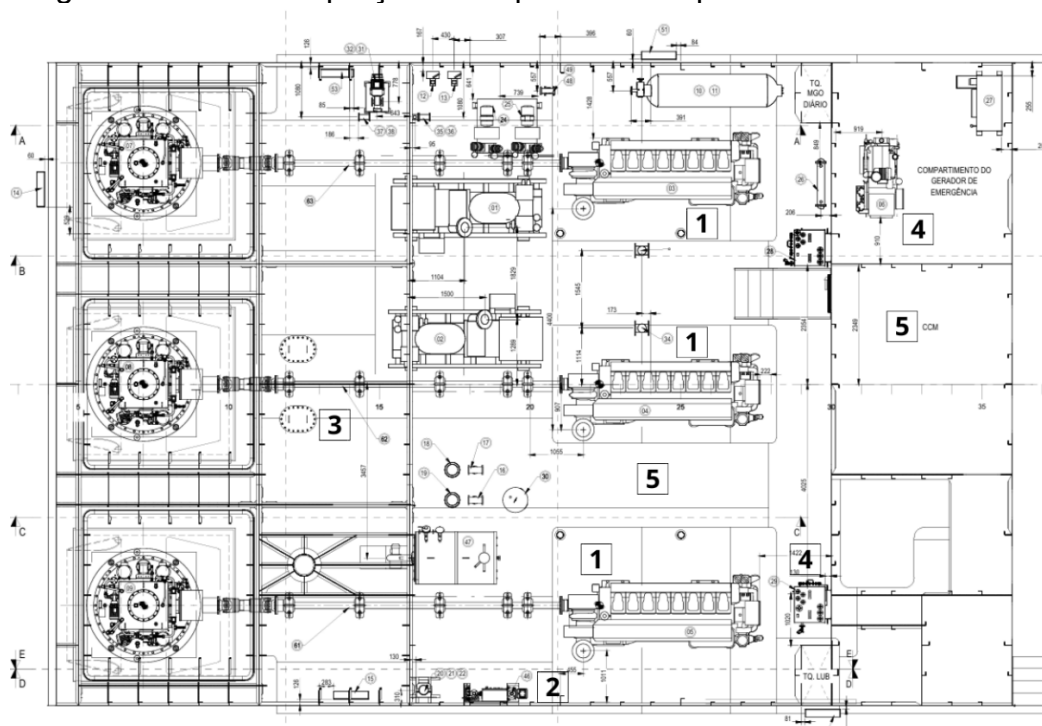
A praça de máquinas é um dos compartimentos mais relevantes da embarcação, pois abriga os principais sistemas responsáveis pela propulsão e pela geração de energia elétrica. Nesse espaço estão instalados equipamentos como o motor principal,

caixas de engrenagens, geradores e sistemas auxiliares, os quais atuam de forma integrada para assegurar o movimento da embarcação e o suprimento energético necessário aos sistemas de bordo (Pereira Junior, 2024).

Além da função propulsiva, a praça de máquinas é responsável pelo tratamento e pela circulação de fluidos essenciais à operação do navio, como água, óleo combustível e óleo lubrificante, bem como pela ventilação e controle térmico do ambiente. Devido à elevada complexidade e à concentração de equipamentos, esse compartimento exige um layout organizado, monitoramento contínuo e manutenção periódica, sendo operado por uma equipe técnica especializada para garantir a segurança, a confiabilidade e a eficiência operacional da embarcação (Pereira Junior, 2024).

É possível observar, na Figura 3, a disposição dos principais equipamentos da embarcação, com os componentes devidamente numerados, sendo: os motores principais indicados pelo número (1), as bombas pelo número (2), os tanques pelo número (3), os sistemas auxiliares pelo número (4) e a circulação operacional pelo número (5). Essa organização evidencia como o espaço foi projetado para atender às demandas mecânicas e energéticas da embarcação.

Figura 3 – Planta da praça de máquinas do empurrador



Fonte: Memorial descritivo da embarcação (2017).

### **3.2 Navegação interior e empurradores fluviais**

A navegação interior tem papel estratégico no transporte de cargas no Brasil, conectando regiões produtoras a portos de exportação com baixo custo em relação aos demais modais de transporte e alta eficiência. Os empurradores fluviais, principais unidades propulsoras desse sistema, são responsáveis pela movimentação de comboios de barcaças, exigindo projetos robustos e eficientes. Diante da busca por maior sustentabilidade, essas embarcações tornam-se foco de estudos sobre tecnologias híbridas de propulsão, visando otimizar o consumo energético e reduzir emissões.

O transporte de cargas é realizado, predominantemente, por meio de comboios fluviais formados por um empurrador rigidamente acoplado a um conjunto de barcaças, nas quais se concentra a carga transportada. A configuração do comboio pode variar conforme o número de barcaças, o tipo de carga e as características da hidrovia, influenciando diretamente a resistência ao avanço e a demanda de potência do sistema propulsivo. O aumento do número de barcaças resulta em maior massa deslocada e área molhada, elevando os esforços hidrodinâmicos e a potência requerida, especialmente em manobras, trechos com correnteza e regimes de baixa velocidade, o que evidencia a importância de sistemas capazes de se adaptar a variações de carga (Fonseca, 2002; Babicz, 2015).

#### **3.2.1 Histórico e importância do transporte hidroviário no Brasil**

O transporte hidroviário no Brasil tem raízes que remontam ao período colonial, quando os rios eram as principais vias de acesso e comunicação entre as regiões. A ocupação do território brasileiro, inicialmente concentrada no litoral, passou a demandar o desenvolvimento de rotas fluviais para facilitar o deslocamento de pessoas e mercadorias para o interior do país (Pompermayer et al., 2014). A extensa rede hidrográfica nacional sempre foi reconhecida como uma das grandes vantagens logísticas do Brasil, embora historicamente subaproveitada.

Atualmente, o Brasil conta com aproximadamente 63 mil quilômetros de rios e lagos, dos quais 42 mil são potencialmente navegáveis, embora apenas cerca de 20 mil quilômetros sejam efetivamente utilizados de forma econômica. Esse potencial expressivo contrasta com a participação modesta da navegação interior na matriz de

transportes nacional, que representa apenas 5%, em comparação com 52% do transporte rodoviário e 30% do ferroviário (Plano Hidroviário Estratégico, 2012).

A navegação interior é crucial para o escoamento da produção agrícola, mineral e industrial, especialmente em regiões como a Amazônia, o Centro-Oeste e o Sul do país. *Commodities* como soja, milho, minério de ferro e óleo bruto de petróleo são transportadas por meio das hidrovias, tornando este modal um pilar estratégico para a economia nacional e para o comércio exterior (Pompermayer et al., 2014).

O estímulo a esse meio de transporte é estratégico para promover a sustentabilidade logística e reduzir os gargalos no escoamento de cargas, especialmente de grãos, minérios e combustíveis. Além disso, o transporte hidrológico é essencial para atender comunidades isoladas onde outros modos de transporte não estão disponíveis.

### **3.2.2 Características operacionais e construtivas de embarcações do tipo empurrador**

As embarcações do tipo empurrador são fundamentais na navegação interior e em operações de cabotagem industrial, sendo responsáveis pela propulsão de comboios. Diferente do que popularmente se conhece como “rebocador”, que geralmente puxa outras embarcações, o empurrador realiza o transporte empurrando. (Repositório Mar).

O empurrador é projetado para atuar como a unidade de propulsão e manobra do comboio, sendo equipado com motores potentes e sistemas de direção que garantem excelente controle, mesmo em ambientes fluviais desafiadores, com curvas acentuadas, bancos de areia ou trechos com baixa profundidade (Lopes, 2012).

Essas embarcações possuem casco de fundo chato, ideal para operar em regiões que necessitam de calado reduzido, além de boca ampla e casario elevado, que proporciona maior visibilidade durante as manobras. São projetadas para oferecer ampla autonomia operacional, permitindo longas jornadas, o que as diferencia dos rebocadores portuários. Contam com sistemas de propulsão robustos, podendo ser equipadas com hélices de passo fixo ou propulsores azimutais, além de dispor de tanques de combustível de grande capacidade, acomodações para a tripulação e sistemas próprios de geração de energia elétrica. (Wikipedia, 2025).

Nesse cenário, os empurradores fluviais destacam-se como solução ideal para pequena cabotagem oceânica. Sua operação combina tripulação reduzida, alta

manobrabilidade em águas costeiras e custos operacionais competitivos, além de manutenção simplificada. Essas características garantem viabilidade técnica e econômica para transporte de cargas em rotas costeiras (Repositório Mar).

### ***3.2.3 Aplicações típicas e desafios logísticos da navegação interior***

A navegação interior no Brasil é fundamental para o escoamento de grandes volumes de grãos, minérios, fertilizantes e outros produtos, oferecendo uma alternativa logística eficiente, de baixo custo e com menor impacto ambiental em comparação aos modais rodoviário e ferroviário. Está presente em corredores estratégicos, como as hidrovias Tapajós-Amazonas e Paraguai-Paraná, interligando centros produtores a portos. No corredor Norte, por exemplo, comboios com capacidade de até 70 mil toneladas percorrem a rota entre Miritituba (PA) e Barcarena (PA), retirando mais de 1.200 caminhões das estradas e contribuindo para uma matriz de transporte mais sustentável (Hidrovias Do Brasil, 2023)

Esse cenário tem estimulado a instalação e a ampliação de terminais logísticos e de grandes tradings agrícolas ao longo das hidrovias, bem como o aumento da demanda por empurradores e barcaças adaptados às condições operacionais da região. Paralelamente, a crescente preocupação com critérios ambientais, sociais e de governança tem incentivado investimentos em frotas mais eficientes e sustentáveis, incluindo a adoção de tecnologias de propulsão híbrida, capazes de reduzir o consumo de combustível e as emissões de gases poluentes na navegação interior (ANTAQ, 2021; IMO, 2020).

Apesar de seu elevado potencial, a navegação interior enfrenta desafios logísticos consideráveis. Entre eles, destacam-se as restrições sazonais relacionadas às variações do nível dos rios, que comprometem a navegabilidade em períodos de estiagem, impactando diretamente a capacidade de transporte e a previsibilidade das operações. Além disso, há carências históricas de infraestrutura, como falta de dragagem regular, sinalização adequada e terminais intermodais bem estruturados. Tais limitações afetam diretamente a competitividade do modal, impondo custos adicionais e riscos operacionais. (Hidrovias Do Brasil, 2023)

Outro desafio crescente está associado às metas globais de descarbonização. A pressão por redução das emissões de gases de efeito estufa exige que o setor de navegação interior invista em tecnologias mais limpas e eficientes, como sistemas

híbridos, uso de biocombustíveis e melhoria na eficiência energética das embarcações. Apesar de ser um dos modais com menor emissão por tonelada transportada, o transporte hidroviário ainda enfrenta desafios na adaptação às exigências ambientais internacionais e aos compromissos assumidos pelo Brasil no combate às mudanças climáticas. (Cebri, 2023)

Portanto, embora a navegação interior se apresente como uma solução logística altamente eficiente e sustentável, sua plena utilização ainda demanda investimentos consistentes em infraestrutura, gestão ambiental e desenvolvimento tecnológico, além de políticas públicas integradas que reconheçam seu papel estratégico na matriz de transporte nacional.

### **3.3 Sistemas de propulsão naval convencionais**

Os sistemas de propulsão naval convencionais, predominantemente baseados em motores de combustão interna do ciclo Diesel, são essenciais para o deslocamento de embarcações, convertendo a energia dos motores em movimento útil. A eficiência operacional e a confiabilidade desses sistemas são cruciais para operações fluviais e marítimas. Compreender seu funcionamento e os tipos de propulsores é fundamental para avaliar alternativas tecnológicas mais sustentáveis, como a propulsão híbrida e elétrica.

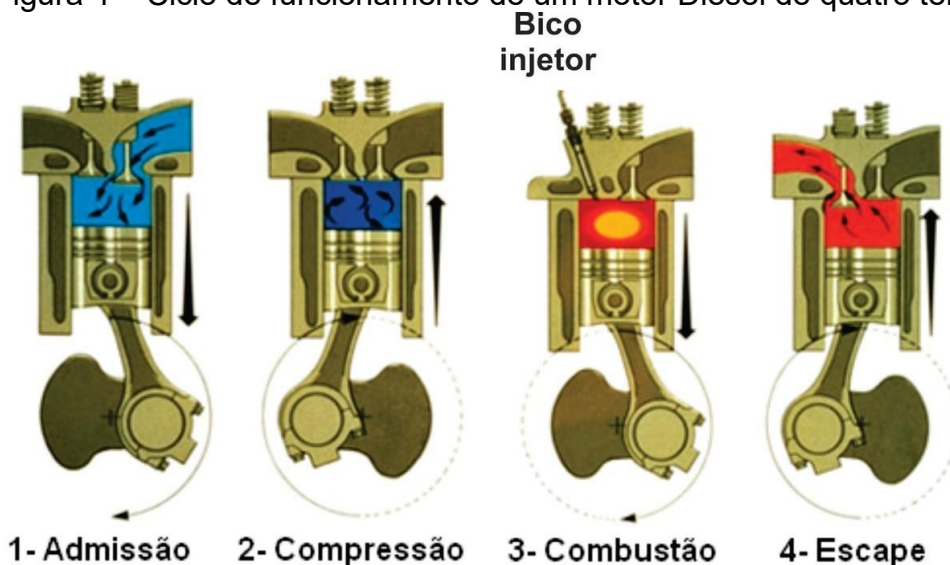
#### **3.3.1 *Princípios de funcionamento dos motores a combustão ciclo Diesel***

Os motores de combustão interna do ciclo Diesel são amplamente utilizados na propulsão naval devido à sua elevada eficiência térmica, robustez e confiabilidade operacional. A ideia básica por trás de um motor Diesel é a ignição por compressão, onde o ar é comprimido dentro do cilindro até atingir uma temperatura alta o suficiente para que a combustão injetada se inflame sem a necessidade de uma centelha. (Heywood, 1988)

No ciclo Diesel idealizado de quatro tempos, o funcionamento é descrito pelas fases de admissão, compressão, combustão e exaustão, conforme ilustrado na Figura 4. O pistão se move para baixo durante a admissão, permitindo a entrada de ar. Na compressão, o pistão sobe, comprimindo esse ar a pressões que podem chegar a 4

MPa (600 psi) e temperaturas próximas de 800 K (527 °C). Ao final dessa etapa, ocorre a injeção do combustível (bico injetor) a alta pressão, iniciando-se a combustão por autoignição. A combustão eleva significativamente a pressão dentro do cilindro, gerando a força que move o pistão para baixo durante a expansão. Finalmente, na fase de exaustão, os gases queimados são expelidos (Heywood, 1988).

Figura 4 – Ciclo de funcionamento de um motor Diesel de quatro tempos.



Fonte: LinkedIn (2016).

Do ponto de vista termodinâmico, o ciclo Diesel idealizado diferencia-se do ciclo Otto principalmente pela forma como ocorre a adição de calor, sendo realizada a pressão constante, enquanto no ciclo Otto ocorre a volume constante. Embora, teoricamente, o ciclo Otto possa apresentar maior eficiência para uma mesma taxa de compressão, os motores Diesel operam com taxas de compressão significativamente mais elevadas, o que resulta, na prática, em maior eficiência térmica (Pulkrabek, 2003).

Na indústria naval, motores Diesel são amplamente utilizados por oferecerem elevado torque em baixas rotações, alta eficiência térmica, baixo consumo específico e grande robustez. Essas características tornam esse tipo de motor ideal para operações contínuas e sob altas cargas, consolidando sua ampla aplicação na propulsão naval.

### 3.3.2 Motores de médio e grande porte em embarcações fluviais

Os motores de médio e grande porte desempenham um papel fundamental na operação de embarcações fluviais, especialmente aquelas destinadas à navegação

comercial, transporte de cargas e operações de empurradores. São projetados para oferecer elevado torque em baixas rotações, aliado à robustez, durabilidade e alta eficiência energética, características essenciais para suportar longas jornadas operacionais e ambientes severos.

De acordo com Babicz (2015, p. 176), os motores utilizados na propulsão naval são classificados conforme a faixa de rotação em três categorias. Os motores de baixa rotação, com até 120 rpm, são geralmente motores de dois tempos, acoplados diretamente ao eixo propulsor, dispensando o uso de redutores. Os de média rotação, operando entre aproximadamente 250 e 1.200 rpm, são motores de quatro tempos, aplicados tanto na geração de energia elétrica quanto na propulsão principal. Já os motores de alta rotação, acima de 1.400 rpm, são destinados principalmente a embarcações menores e aos sistemas auxiliares. Esses motores podem operar em ciclos de dois ou quatro tempos, sendo aplicados tanto em sistemas de propulsão direta quanto em arranjos diesel-elétricos, bastante comuns na navegação fluvial.

No contexto da navegação fluvial, observa-se a predominância do uso de motores de quatro tempos de média rotação, cujas faixas de potência típicas variam entre 500 kW e 10.000 kW, dependendo da aplicação e do porte da embarcação. Esses motores são projetados para operar com elevado torque, baixo consumo específico de combustível e alta eficiência térmica, atendendo às exigências de confiabilidade e desempenho impostas pelas operações em rios e hidrovias interiores (MAN Energy Solutions, 2024).

Entre os aspectos relevantes desses motores, destaca-se o foco crescente na eficiência energética e na redução das emissões. Os fabricantes investem fortemente em tecnologias como turbo alimentadores de alta eficiência, sistemas de controle eletrônico dos ciclos de combustão, além de soluções para cumprimento das normas ambientais da Organização Marítima Internacional (IMO do inglês *International Maritime Organization*), como sistemas de recirculação de gases de exaustão (EGR do inglês *Exhaust Gas Recirculation*) e redução catalítica seletiva (SCR do inglês *Selective Catalytic Reduction*) (MAN Energy Solutions, 2024).

No contexto fluvial, é comum a utilização de motores de quatro tempos em embarcações como empurradores e rebocadores, que necessitam de alta confiabilidade, torque contínuo e capacidade de operação em regimes prolongados, inclusive com variações de carga associadas às condições hidrodinâmicas dos rios. Além disso, observa-se um avanço na adoção de sistemas híbridos, que combinam

motores diesel com geradores elétricos, proporcionando maior flexibilidade operacional e redução de consumo, especialmente em manobras e operação em baixas velocidades (Babicz, 2015)

Portanto, os motores de médio e grande porte aplicados na navegação fluvial são fundamentais para garantir eficiência, segurança e viabilidade econômica, alinhando robustez mecânica, eficiência térmica e conformidade ambiental às exigências do setor.

### **3.3.3 Tipos de propulsores e suas aplicações**

Os sistemas de propulsão utilizados nas embarcações variam conforme a finalidade da operação e o nível de manobrabilidade exigido. Entre os principais tipos de propulsores aplicados estão os convencionais com hélice de passo fixo e os azimutais. A escolha entre esses sistemas afeta diretamente a eficiência, a estabilidade e a segurança durante as manobras nas vias navegáveis e portuárias.

O propulsor convencional com hélice de passo fixo (FPP do inglês *Fixed Pitch Propeller*), ilustrado na Figura 5, é amplamente utilizado em embarcações que operam em regimes constantes de velocidade, sendo valorizado por sua simplicidade mecânica e menor custo de construção e manutenção. Entretanto, esse tipo apresenta desempenho limitado em termos de manobrabilidade, especialmente em ambientes com correntes ou necessidade de movimentos laterais. A utilização de hélices duplas ou triplas e o uso de acessórios como tubulões-Kort ou lemes de flanco tentam compensar essa limitação, mas não alcançam a versatilidade dos sistemas mais modernos (Aguiar et al., 2017).

Figura 5 – Hélice de Passo Fixo (FPP)



Fonte: Porto Náutico (2023).

Os propulsores azimutais apresentam características de manobrabilidade significativamente distintas em relação aos sistemas propulsivos convencionais, o que proporciona excelente desempenho em manobras que exigem alto grau de controle, como curvas de giro. Essa eficiência está relacionada à possibilidade de rotação completa desses sistemas em torno do eixo vertical, permitindo a orientação do empuxo em 360°, conforme ilustrado na Figura 6, o que possibilita à embarcação manobrar com elevada precisão, inclusive girando em torno do próprio centro de gravidade (Souza, 2023).

Figura 6 – Azimutal



Fonte: Sinaval (2017).

Como cita Souza (2023, p. 4), a aplicação prática desse tipo de propulsão pode ser observada em empurradores fluviais, rebocadores portuários modernos, navios offshore e embarcações que demandam posicionamento dinâmico. Além disso, os propulsores azimutais podem ser combinados com sistemas híbridos ou elétricos, como é o caso dos propulsores em cápsulas (*pods*), oferecendo ainda mais eficiência energética e controle de emissão.

Dessa forma, a escolha do tipo de propulsor a ser utilizado em uma embarcação deve considerar não apenas fatores operacionais, como eficiência e consumo, mas também as exigências específicas de manobrabilidade, perfil de navegação e ambiente de operação. Seja em navios de grande porte, embarcações de apoio *offshore* ou empurradores fluviais.

### **3.3.4 Eficiência energética e consumo específico dos motores marítimos**

A eficiência energética dos motores marítimos representa a capacidade desses sistemas de converter a energia química liberada durante a combustão em energia mecânica útil, minimizando perdas térmicas e mecânicas. O desempenho desses motores está diretamente relacionado a fatores como o tipo de propulsor, o regime operacional, a carga aplicada e as tecnologias empregadas para controle de combustão, recuperação de calor e redução de emissões. Nesse contexto, a principal métrica de avaliação expressa em gramas por quilowatt-hora (g/kWh), é o consumo específico de combustão, essencial para a gestão operacional e de controle ambiental. (MAN Energy Solutions, 2024).

Os motores marítimos alcançam maior eficiência quando operam em condições de carga ótimas, normalmente em torno de 85 % da carga contínua máxima (MCR do inglês *Maximum Continuous Rating*). No entanto, segundo a Sustainable Ships (2022), o consumo específico de combustível (SFC do inglês *Specific Fuel Consumption*), varia aproximadamente entre 155 e 225 g/kWh nesse regime. Isso demonstra que o carregamento ideal é essencial para a eficiência energética, pois o SFC aumenta drasticamente em cargas reduzidas, chegando a duplicar durante a marcha lenta (7 % da MCR) e se tornando ainda mais elevado durante as operações em regime muito reduzido, comprometendo a sustentabilidade ambiental e elevando o desgaste por funcionamento abaixo da rotação ideal. (Sustainable Ships)

Considerando motores utilizados no setor, os modelos da série ME-C da fabricante MAN apresentam valores otimizados de SFC entre 165 e 185 g/kWh, dependendo da carga e do tipo de combustível. Já o modelo Wärtsilä 31, ilustrado na Figura 7, alcança consumo específico de até 165 g/kWh, sendo reconhecido como um dos mais eficientes em sua categoria (Sustainable Ships).

Figura 7 – Motor Wärtsilä 31



Fonte: Wärtsilä (2015).

Além das soluções tecnológicas, fatores operacionais também desempenham papel relevante. Medidas como o controle de velocidade, planejamento de rotas, manutenção preventiva e gerenciamento da carga propulsiva têm impacto direto sobre o consumo total. Estudos de caso com navios-tanque e graneleiros demonstram que pequenas reduções de velocidade podem representar ganhos expressivos de eficiência energética, sem comprometer a operação. Esse tipo de abordagem é particularmente aplicável a embarcações como empurradores, cujo perfil de carga variável ao longo das viagens em rios exige estratégias dinâmicas de operação para manter a eficiência energética. (Schiller, 2016).

Por fim, normas técnicas como a ISO 15016:2015 fornecem metodologias padronizadas para avaliar o desempenho energético de navios a partir de dados de testes de mar, permitindo a quantificação precisa dos ganhos ambientais obtidos por meio de ajustes técnicos e operacionais. Tais ferramentas reforçam a importância de integrar a engenharia naval a compromissos globais de sustentabilidade. (ISO, 2015)

A crescente demanda por soluções de baixo impacto ambiental, associada à necessidade de eficiência em embarcações de navegação interior, tem impulsionado o desenvolvimento de sistemas híbridos de propulsão. Em empurradores, que frequentemente operam com variações bruscas de carga e exigem flexibilidade operacional, os sistemas híbridos surgem como alternativa promissora ao aliar motores convencionais a sistemas de armazenamento e gerenciamento inteligente de energia. Essa integração pode resultar em significativa redução de emissões e otimização do consumo específico, especialmente em manobras, períodos de espera e trechos de navegação com baixa exigência de potência.

### **3.4 Combustíveis marítimos: HFO e MGO**

O setor de transporte marítimo tem desempenhado um papel central nas discussões globais sobre emissões atmosféricas e sustentabilidade energética, sobretudo em função da sua dependência de combustíveis fósseis. No contexto do dimensionamento de um sistema híbrido para empurradores, é imprescindível a análise detalhada das características operacionais, físico-químicas e ambientais dos principais combustíveis atualmente utilizados: o óleo combustível pesado (HFO do inglês *Heavy Fuel Oil*) e o óleo diesel marítimo (MGO do inglês *Marine Gas Oil*).

#### **3.4.1 Propriedades físico-químicas do HFO (*Heavy Fuel Oil*)**

O óleo combustível pesado é o combustível utilizado por aproximadamente 95% da frota mercante global. Característico de motores marítimos de grande porte e baixa rotação, este derivado de petróleo apresenta qualidade inferior e é amplamente adotado no transporte marítimo principalmente por motivos econômicos (Schiller, 2016).

De acordo com Schiller (2016, p9)

O HFO tem como característica elevada viscosidade em comparação com o MGO e a sua densidade pode chegar a  $991 \text{ kg/m}^3$  e uma viscosidade superior a  $180 \text{ mm}^2/\text{s}$ . O combustível também apresenta uma série de impurezas como as faltenos, enxofre, vanádio, materiais inorgânicos e contaminantes como água, sódio, sedimentos, alumínio, lodo, fibras e produtos de oxidação. Com isto, o combustível não pode ser diretamente injetado no motor sem que antes passe por processos de purificação e pré-

aquecimento. Estes processos exigem um sistema bastante complexo e pesado contendo bombas, centrífugas, tanques de armazenamento e de decantação, que limitam o uso deste tipo de combustível a embarcações de grande porte.

O HFO é um subproduto da destilação a vácuo do petróleo bruto, caracterizando-se como um combustível residual de alta densidade e elevada viscosidade. Seu teor de enxofre pode variar entre 0,5% e 3,5% em massa, sendo que, antes da vigência da regulamentação internacional da Organização Marítima Internacional (IMO inglês *International Maritime Organization*), o teor máximo permitido alcançava 4,5% (Gucma, 2025; Virtue Marine, 2024).

Além disso, o HFO possui um consumo específico médio de aproximadamente 213 g/kWh, com um teor de enxofre típico de 0,5% m/m. As emissões específicas associadas à sua combustão incluem cerca de 280,8 g/kWh de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), 5,76 g/kWh de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), 1,8 g/kWh de óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) e 0,3348 g/kWh de material particulado (PM<sub>10</sub>), além de traços de monóxido de carbono (CO), metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), conforme demonstrado na Tabela 1 (Wei, 2020).

Tabela 1 – Consumo específico e emissões específicas do HFO

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Consumo específico (g/kWh)</b>	213 g/kWh
<b>Enxofre (% m/m)</b>	0,5 %
<b>Emissões específicas</b>	_____
<b>Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	280,8 g/kWh
<b>Metano (CH<sub>4</sub>)</b>	0,0018 g/kWh
<b>Dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>)</b>	0,00016 g/kWh
<b>Monóxido de carbono (CO)</b>	0,468 g/kWh
<b>Óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>)</b>	5,76 g/kWh
<b>Material particulado (PM<sub>10</sub>)</b>	0,3348 g/kWh
<b>Óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>)</b>	1,8 g/kWh
<b>Dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>)</b>	1,065 g/kWh

Fonte: Adaptado de Wei (2020)

### **3.4.2 Necessidade de pré-aquecimento e sistemas auxiliares (caldeiras)**

Devido à elevada viscosidade do óleo combustível pesado em temperatura ambiente, é essencial que este passe por um processo de pré-aquecimento antes de sua utilização nos motores principais. Essa medida visa reduzir a resistência ao escoamento e garantir o adequado rendimento das bombas e dos sistemas de injeção (Carvalho, 2014).

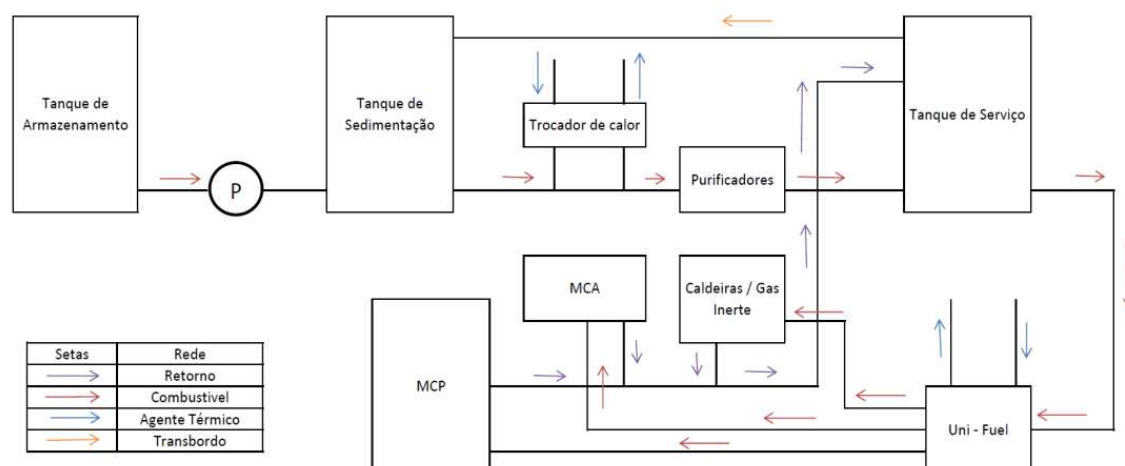
Conforme descrito por Carvalho (2014), o sistema de óleo combustível dos navios inclui uma unidade de controle de óleo, composta por viscosímetro, trocador de calor e bombas, responsáveis por ajustar a viscosidade e a temperatura do combustível antes de sua injeção no motor.

O processo de aquecimento é realizado através de trocadores de calor, que utilizam vapor gerado por caldeiras auxiliares ou por sistemas elétricos, dependendo do arranjo da planta de máquinas da embarcação (Carvalho, 2014).

Além disso, o HFO necessita de tratamento para remoção de contaminantes. Este processo é feito através de purificadores centrífugos, que separam água e partículas sólidas presentes no combustível, assegurando maior vida útil aos componentes do motor e prevenindo falhas operacionais (Carvalho, 2014).

O processo de pré-aquecimento do óleo combustível a bordo de embarcações é parte integrante de um sistema de tratamento de combustível composto por diversas etapas sequenciais. Inicialmente, o HFO é armazenado em tanques específicos, sendo posteriormente transferido por meio de bombas para o tanque de sedimentação, onde ocorre a decantação de impurezas sólidas e separação gravitacional de água. Em seguida, o combustível passa por um trocador de calor, cuja função é reduzir sua viscosidade, adequando-o para a etapa de purificação. Na sequência, o óleo é direcionado ao purificador centrífugo, que remove os contaminantes mais pesados e resíduos de água. Após essa purificação, o HFO é armazenado em tanques de serviço, ficando disponível para os motores. Por fim, antes de ser efetivamente injetado, o óleo passa pela unidade de controle de óleo, equipada com viscosímetro, trocadores de calor e bombas, responsáveis por garantir que o combustível atinja a viscosidade e temperatura ideais para a combustão eficiente nos motores principais (Carvalho, 2014). Na Figura 8 mostra de forma esquematizada o processo.

Figura 8 – Processo de pré-aquecimento do HFO



Fonte: Carvalho (2014).

Nas situações de transição entre combustíveis com diferentes propriedades, como a cambagem de HFO para MGO, é fundamental o controle gradual da temperatura para evitar choques térmicos e garantir a segurança do sistema de alimentação de combustível. Procedimentos específicos de controle da cambagem podem ser observados através de sistemas automáticos que regulam gradualmente os parâmetros de viscosidade e temperatura ao longo do tempo (Carvalho, 2014).

### 3.4.3 Características do MGO (Marine Gas Oil) e sua aplicação em geradores

O gásóleo marítimo, que é um combustível de melhor qualidade, é mais utilizado em embarcações de pequeno e médio porte ou em motores auxiliares das embarcações comerciais. O MGO é um combustível destilado leve, com baixa viscosidade e reduzido teor de enxofre, geralmente inferior a 0,1% m/m, tornando-se adequado para operações em áreas de controle de emissões (ECAs do inglês *Emission Control Areas*), conforme regulamentado pela Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição Causada por Navios (MARPOL do inglês *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*), Anexo VI (IMO, 2016).

Ao contrário do HFO, o MGO não necessita de pré-aquecimento, podendo ser diretamente bombeado e injetado nos motores em temperatura ambiente, essa característica operacional reduz a complexidade do sistema de alimentação de combustível e contribui para menor consumo de energia dos sistemas auxiliares (Virtue Marine, 2024).

O MGO apresenta características que o tornam distinto do óleo diesel marítimo convencional, uma vez que é composto apenas por frações destiladas, sem a presença de resíduos pesados. Essa pureza na formulação proporciona maior estabilidade térmica e reduz significativamente a geração de fuligem durante o processo de combustão. Por possuir queima mais limpa e uniforme, o MGO é amplamente empregado em geradores auxiliares das embarcações, os quais garantem o fornecimento de energia elétrica essencial para sistemas de navegação, climatização, iluminação e demais equipamentos de suporte a bordo.

### **3.5 Sistemas de geração de energia elétrica em embarcações**

A geração de energia elétrica a bordo é um subsistema essencial para garantir o funcionamento seguro e eficiente de sistemas de navegação, propulsão assistida, iluminação, climatização, automação, comunicações, segurança e habitabilidade. Em empurradores fluviais, uma infraestrutura elétrica robusta é vital para manter a operação mesmo em manobras intensas e condições adversas (Caterpillar, 2022).

Normalmente, o suprimento elétrico é feito por grupos geradores com motores a combustão ciclo Diesel, que acionam alternadores de corrente alternada. A seleção do motor, do tipo de gerador e da potência instalada depende da classe da embarcação, perfil operacional, criticidade das cargas e normas aplicáveis (IMO, 2014). É obrigatório ter fontes de energia de emergência para cargas essenciais, como iluminação, bombas de incêndio e sistemas de navegação, em caso de falha na geração principal (ABS, 2020).

Esses geradores utilizam, em geral, óleo diesel marítimo por oferecer menor viscosidade, estabilidade térmica e baixo teor de enxofre, atendendo a limites de emissões da Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição Causada por Navios (MARPOL do inglês International Convention for the Prevention of Pollution from Ships), Anexo VI (IMO, 2020). A arquitetura elétrica inclui geradores principais e de emergência, organizados em barramentos com transferência automática. O gerador de emergência garante o suprimento de cargas críticas em caso de falhas (IEEE, 2018).

A confiabilidade é reforçada com estratégias de redundância, proteção contra sobrecargas, automação dos painéis e balanceamento de carga, prolongando a vida útil dos sistemas (Bright Hub Engineering, 2012). Em embarcações modernas, tecnologias híbridas, como baterias, inversores e sistemas automatizados de gestão de

energia, reduzem o consumo de combustível, as emissões e aumentam a autonomia, sendo aplicadas em projetos de *retrofit* e certificações ambientais (Wärtsilä, 2023).

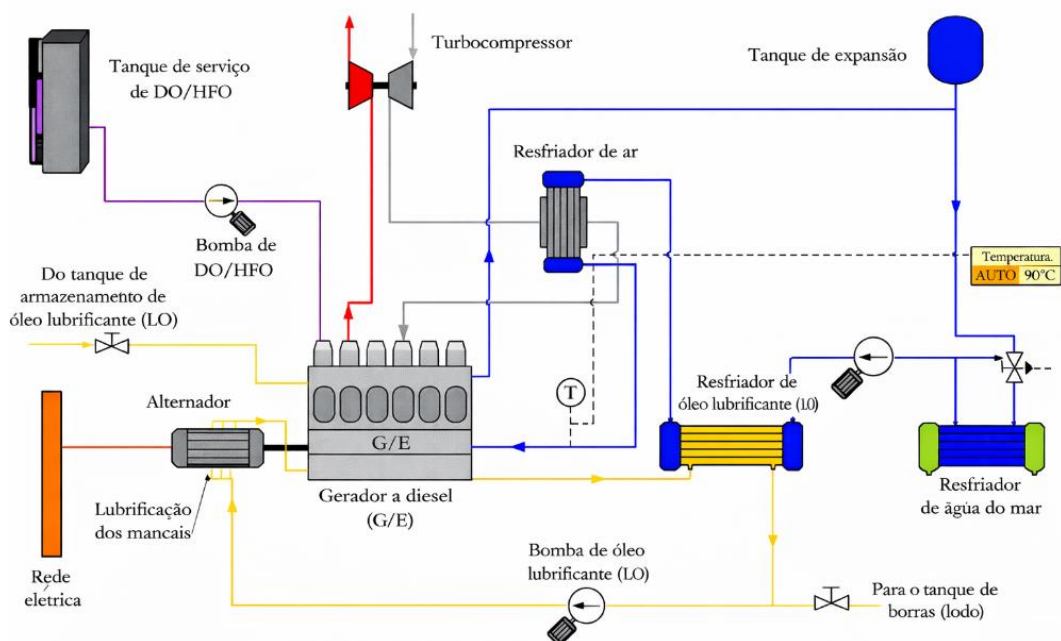
### **3.5.1 Tipos de geradores e motores Diesel auxiliares**

Os geradores e motores Diesel auxiliares exercem papel essencial em embarcações de médio e grande porte, sendo responsáveis pelo fornecimento contínuo de energia elétrica às cargas não propulsivas, como sistemas de automação, iluminação, climatização, navegação, habitabilidade e tratamento de efluentes. Nas embarcações do tipo empurrador fluvial, essas unidades garantem também o funcionamento dos propulsores azimutais quando desacoplados do sistema mecânico principal, reforçando a importância da geração elétrica embarcada (Wärtsilä, 2023).

De modo geral, os grupos geradores são compostos por um motor de combustão interna do tipo ciclo Diesel acoplado a um alternador síncrono trifásico, sendo ambos montados sobre uma base comum, com acoplamento elástico para absorver vibrações. A seleção do tipo e da capacidade do conjunto deve considerar fatores como carga média, regime de operação, disponibilidade de espaço na casa de máquinas e as exigências da classificação da embarcação.

A Figura 9 apresenta um conjunto típico de motor Diesel auxiliar e gerador elétrico síncrono, destacando a configuração integrada desses equipamentos, utilizada em sistemas de geração de energia elétrica a bordo de embarcações.

Figura 9 – Conjunto típico de motor Diesel auxiliar e gerador síncrono



Fonte: Adaptado de Pierre Marty (2014).

Os motores Diesel auxiliares, apresentam variações de acordo com o número de cilindros, o regime de rotação (rpm), o tipo de aspiração (natural ou turbinada) e a sua finalidade. Em aplicações navais, os mais utilizados são:

- Motores de média rotação (900–1200 rpm): equilibram durabilidade com compactidade, sendo aplicados em embarcações com perfil de carga variável. Exemplo típico é o Caterpillar C18, com capacidade para acionar geradores de até 600 ekW em 60 Hz (CATERPILLAR, 2022).
- Motores de alta rotação (1500–1800 rpm): empregados em embarcações de menor porte ou como motores de emergência, pela resposta rápida em partidas e pela menor massa. Exemplo representativo é o Caterpillar C4.4, utilizado em sistemas de emergência com potência em torno de 90 ekW.

Tanto os motores de média rotação quanto os de alta rotação são projetados para operar, predominantemente, com combustíveis destilados como o óleo diesel marítimo (MGO do inglês Marine Gas Oil), cuja baixa viscosidade e menor teor de enxofre atendem às regulamentações ambientais vigentes, especialmente as estabelecidas pela MARPOL – Anexo VI (IMO, 2020).

O alternador acoplado ao motor converte a energia mecânica em energia elétrica, geralmente em corrente alternada trifásica com frequência de 60 Hz (ou 50 Hz, dependendo do sistema). Os alternadores são do tipo síncrono, com excitação

eletrônica ou por ímãs permanentes. Características importantes incluem: Regulador eletrônico de tensão (AVR); Capacidade de operação em paralelo com outros geradores; Proteções contra sobrecarga e curto-circuito; Compatibilidade com sistemas de gerenciamento de energia (PMS do inglês *Power Management Systems*).

A arquitetura de geração elétrica pode incluir configurações redundantes, com dois ou mais grupos geradores principais operando em paralelo, permitindo o compartilhamento de carga (*load sharing*) automático e aumentando a confiabilidade do sistema elétrico, especialmente em missões críticas ou de longa duração (IEEE, 2018).

A escolha dos geradores e motores auxiliares deve considerar ainda a necessidade de manutenção simplificada, a disponibilidade de peças de reposição e a compatibilidade com os sistemas de automação existentes.

### **3.5.2 Funções dos grupos geradores principais e de emergência**

Os grupos geradores instalados a bordo de embarcações têm papel fundamental na garantia da continuidade operacional dos sistemas elétricos, sendo classificados, conforme sua função e criticidade, em grupos geradores principais e grupos geradores de emergência. Cada tipo atende a demandas específicas e deve cumprir requisitos normativos rigorosos.

Os grupos geradores principais são responsáveis por suprir a demanda total ou parcial de energia elétrica da embarcação durante sua operação regular. Estes geradores alimentam sistemas auxiliares, sistemas de propulsão auxiliar (como propulsores azimutais), equipamentos de conforto, iluminação, automação, comunicação e sistemas operacionais da embarcação. O dimensionamento e o número desses geradores dependem do perfil operacional da embarcação, da classe de certificação e da potência total demandada.

A operação dos grupos principais normalmente ocorre em regime contínuo, podendo trabalhar em paralelo para garantir redundância e melhor gerenciamento da carga (IEEE, 2018). A capacidade de realizar o compartilhamento de carga (*load sharing*) permite a divisão equilibrada da carga entre as unidades, aumentando a eficiência energética e reduzindo desgastes mecânicos. O controle automático e a automação desses sistemas também são essenciais para responder rapidamente a variações na demanda de carga, garantindo estabilidade da rede elétrica embarcada.

Os grupos geradores de emergência possuem função crítica de prover energia elétrica para cargas essenciais em situações de falha da alimentação principal. Essas cargas incluem sistemas de iluminação de emergência, bombas de incêndio, sistemas de alarme, instrumentos de navegação, sistemas de comunicação e controle, além de equipamentos que garantem a segurança da tripulação e da embarcação.

Normas internacionais, como as da Organização Marítima Internacional (IMO do inglês *International Maritime Organization*) e classificadoras como a ABS (*American Bureau of Shipping*), impõem exigências específicas para o sistema de geração de emergência, incluindo: Independência física e funcional em relação aos grupos principais; Capacidade de partida automática e rápida, garantindo fornecimento em segundos após a falha; Potência dimensionada para suportar todas as cargas críticas da embarcação; Operação autônoma e confiável em situações adversas, incluindo incêndios, inundações ou falhas elétricas (IMO, 2020; ABS, 2019).

Os motores Diesel utilizados nos grupos de emergência são normalmente de alta rotação, visando agilidade na partida, e alimentados preferencialmente por combustíveis de rápida resposta e menor viscosidade, como o MGO. Sua operação é testada periodicamente para assegurar prontidão.

A arquitetura elétrica embarcada integra os grupos geradores principais e de emergência por meio de painéis de distribuição e PMS. Estes sistemas monitoram continuamente a qualidade da energia, distribuem as cargas de forma eficiente e ativam os geradores de emergência automaticamente quando necessário, minimizando o risco de interrupções.

Além disso, práticas de manutenção preventiva e procedimentos operacionais rigorosos são indispensáveis para garantir a confiabilidade e a segurança do sistema elétrico a bordo (DNV, 2021).

### **3.5.3 Distribuição elétrica de bordo e apoio a sistemas críticos e habitabilidade**

A distribuição elétrica a bordo das embarcações constitui a rede responsável por fornecer energia elétrica de forma confiável e assegura a todos os sistemas e equipamentos necessários para a operação, segurança, habitabilidade e conforto da tripulação e passageiros. Esta rede deve ser projetada para suportar diferentes níveis de carga, garantir a continuidade do fornecimento e possibilitar manutenções sem comprometer a operação da embarcação.

Arquitetura do Sistema de Distribuição: O sistema elétrico de distribuição é geralmente organizado em barramentos principais (*bus bars*), que recebem a energia dos grupos geradores e a distribuem para os diversos circuitos de consumo. Esses barramentos podem ser divididos em:

- Barramento principal (bus bar principal): concentra a distribuição para cargas normais de operação, como sistemas de propulsão auxiliar, iluminação geral, equipamentos de navegação e automação.
- Barramento de emergência (bus bar de emergência): alimenta exclusivamente cargas críticas, como iluminação de emergência, sistemas contra incêndio, bombas de lastro e sistemas de comunicação essenciais, garantindo operação contínua mesmo em situações adversas (DNV GL, 2021).

Os sistemas modernos utilizam dispositivos automáticos de transferência de carga (ATS do inglês *Automatic Transfer Switches*), que permitem a comutação rápida entre fontes de alimentação, evitando interrupções na energia fornecida a cargas sensíveis (ABS, 2019).

Apoio a Sistemas Críticos: A continuidade da alimentação dos sistemas críticos é uma exigência normativa para embarcações classificadas, dada sua importância para a segurança e integridade da embarcação. Entre estes sistemas, destacam-se:

- Iluminação de emergência e sinalização;
- Bombas de combate a incêndio e sistemas fixos de supressão;
- Sistemas de navegação e comunicação;
- Sistemas de controle automático e monitoramento de alarmes;
- Equipamentos de suporte à vida e habitabilidade (IMO, 2020).

A alimentação destes sistemas é assegurada pelo gerador de emergência e por fontes de energia ininterruptas, quando aplicáveis, que garantem operação contínua mesmo em falhas de energia.

Suporte à Habitabilidade: Além dos sistemas críticos, o sistema elétrico embarcado suporta cargas destinadas à habitabilidade, que envolvem climatização, iluminação convencional, equipamentos de cozinha, sistemas de tratamento de ar e água, entre outros. A distribuição para essas cargas deve considerar aspectos como qualidade da energia, proteção contra sobrecargas, harmônicos e interferências eletromagnéticas, visando conforto e segurança para os ocupantes da embarcação (DNV GL, 2021).

Medidas de Segurança e Manutenção: Para garantir a integridade do sistema de distribuição elétrica, são adotadas medidas como seccionamento de circuitos, proteção por disjuntores e fusíveis, aterramento eficiente e sistemas de monitoramento contínuo. A manutenção preventiva e inspeções regulares são fundamentais para identificar falhas precocemente e evitar falhas catastróficas que possam comprometer a operação ou a segurança (IEEE, 2018).

### ***3.5.4 Dimensionamento do sistema de geração de energia para propulsão híbrida***

A transição para sistemas de propulsão híbrida em embarcações fluviais exige uma reavaliação criteriosa do sistema de geração de energia elétrica a bordo, sobretudo no que se refere à capacidade instalada, à estabilidade dos barramentos e à integração entre fontes de energia convencionais e auxiliares. O dimensionamento adequado deve considerar, além das cargas tradicionais de bordo, a inclusão de motores elétricos acoplados às linhas de eixo, que atuarão como elementos de tração complementar ou principal em determinadas condições operacionais.

Para a presente proposta de sistema híbrido, considera-se a instalação de motores elétricos com potência estimada de 500 kW por linha de eixo, totalizando 1.500 kW. Esses motores serão responsáveis por operar em regime parcial, estimado em até 40% do tempo de navegação, especialmente em manobras, velocidade de cruzeiro reduzida ou navegação assistida em áreas ambientalmente sensíveis. A escolha da potência baseia-se em critérios de carga propulsiva média exigida, eficiência de conversão energética e margem de segurança operacional (Zhang et al., 2018).

Nesse contexto, o sistema de geração de energia elétrica deve ser capaz de:

- Suportar o acréscimo de carga dos motores elétricos sem comprometer o fornecimento às demais cargas de bordo;
- Manter a estabilidade do barramento principal durante picos de demanda;
- Garantir fator de potência adequado e evitar sobrecargas no alternador;
- Integrar, futuramente, sistemas de armazenamento (baterias de íons de lítio) e controladores inteligentes de energia, como inversores bidirecionais e unidades de gerenciamento de energia.

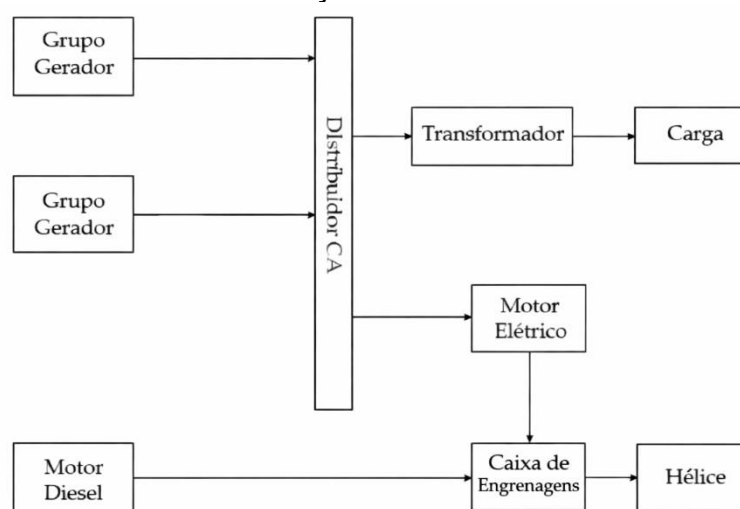
Segundo Caterpillar (2022), o correto dimensionamento de geradores embarcados em ambientes com cargas variáveis deve incluir coeficientes de simultaneidade, fator

de reserva (cerca de 20% acima da carga máxima esperada) e estratégias de operação em paralelo. Para sistemas híbridos, é essencial prever a atuação dos grupos geradores em regime dinâmico, com rampas suaves de carga, evitando ciclos de ligação/desligamento excessivos que podem reduzir a vida útil dos componentes.

Além disso, normas internacionais como a DNV (2021) e a ABS (2020) exigem que, em projetos híbridos, seja previsto um plano de integração elétrica, contendo diagramas unifilares, curvas de carga estimadas por regime de operação, mecanismos de transferência automática de carga e dispositivos de proteção específicos para circuitos de tração elétrica.

A Figura 10 apresenta um exemplo esquemático de arquitetura elétrica híbrida simplificada para embarcações, com integração entre geradores convencionais, motores elétricos de propulsão e banco de baterias.

Figura 10 – Arquitetura elétrica híbrida simplificada com motores elétricos de tração



Fonte: Adaptado de Scholarly Community Encyclopedeia (2023).

O correto dimensionamento e integração do sistema híbrido são, portanto, determinantes para garantir os ganhos esperados em eficiência energética, redução de emissões e flexibilidade operacional.

### 3.6 Propulsão híbrida em embarcações

Os sistemas de propulsão híbrida representam uma solução promissora para os desafios de eficiência energética e ambiental no setor naval, sendo especialmente

vantajosos em embarcações fluviais de grande porte. Ao combinar motores a combustão com tecnologias elétricas e sistemas de gerenciamento de energia, esses sistemas permitem reduzir custos operacionais, prolongar a vida útil dos equipamentos e atender aos rigorosos limites de emissões internacionais, tornando-se uma alternativa viável e sustentável para a navegação interior.

### **3.6.1 Conceito de sistemas híbridos navais: série, paralelo e combinado**

A propulsão híbrida, segundo Vedran et al., 2025 (2025, p. 178), caracteriza-se por integrar duas ou mais fontes de energia a bordo, combinando motores térmicos, geralmente a diesel, com conjuntos elétricos, formando um sistema versátil que permite operação em modos distintos de acordo com o perfil de missão e as condições de navegação. Historicamente, o conceito de hibridização remonta às primeiras embarcações que conjugavam remos e velas, migrando posteriormente para arranjos mecânicos com propulsão a vapor e, atualmente, para a integração entre grupos geradores diesel-elétricos, bancos de baterias e motores de acionamento direto (Meirelles, 2013).

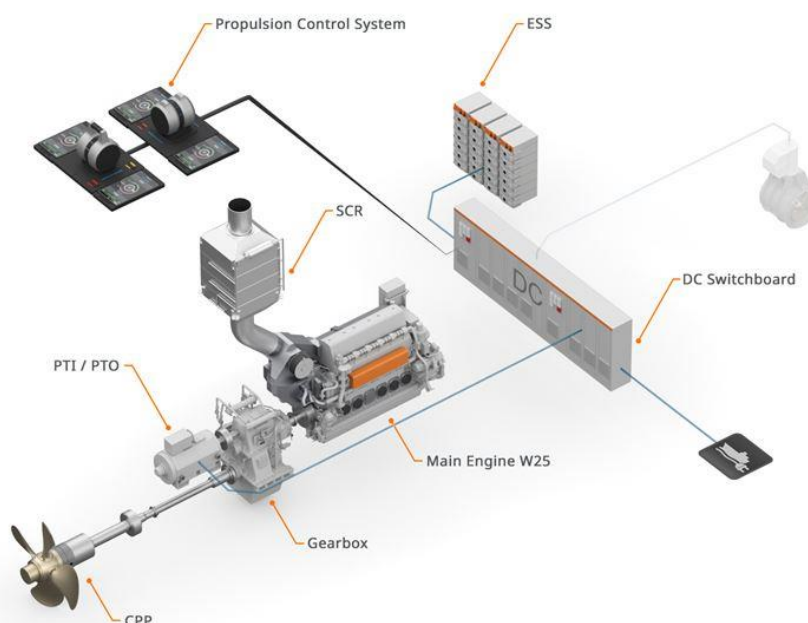
No arranjo série, o motor de combustão não aciona diretamente o eixo propulsor, mas sim alimenta um gerador que converte a energia mecânica em elétrica, a qual é usada para mover motores elétricos acoplados ao sistema de propulsão (Inal et al., 2022). Essa configuração é vantajosa em operações de baixa velocidade ou regimes que exigem variação constante de potência, como manobras em portos ou navegação em trechos rasos e sinuosos de rios.

Já o arranjo paralelo, conforme detalhado por Park e Kim (2024), conecta motor diesel e motor elétrico ao mesmo eixo, permitindo que ambos atuem isolados ou simultaneamente. Isso oferece flexibilidade para alternar a fonte motriz de acordo com a demanda instantânea, sendo o modo diesel prioritário em trechos de cruzeiro a velocidade constante, enquanto o motor elétrico assume papel de suporte durante manobras ou operações silenciosas em zonas sensíveis.

A Figura 11 representa um sistema híbrido paralelo, no qual o motor de combustão principal (Main Engine – ME W25) transmite torque ao eixo propulsor por meio de uma caixa de engrenagens (*gearbox*) e de uma hélice de passo controlável (CPP do inglês *Controllable Pitch Propeller*). Conectado a esse mesmo eixo encontra-se um conjunto

elétrico acoplado por meio do sistema *Power Take In / Power Take Off* (PTI/PTO), que pode atuar como motor elétrico ou como gerador, dependendo do regime de operação.

Figura 11 – Sistema de propulsão híbrido paralelo.



Fonte: Wärtsilä (2023).

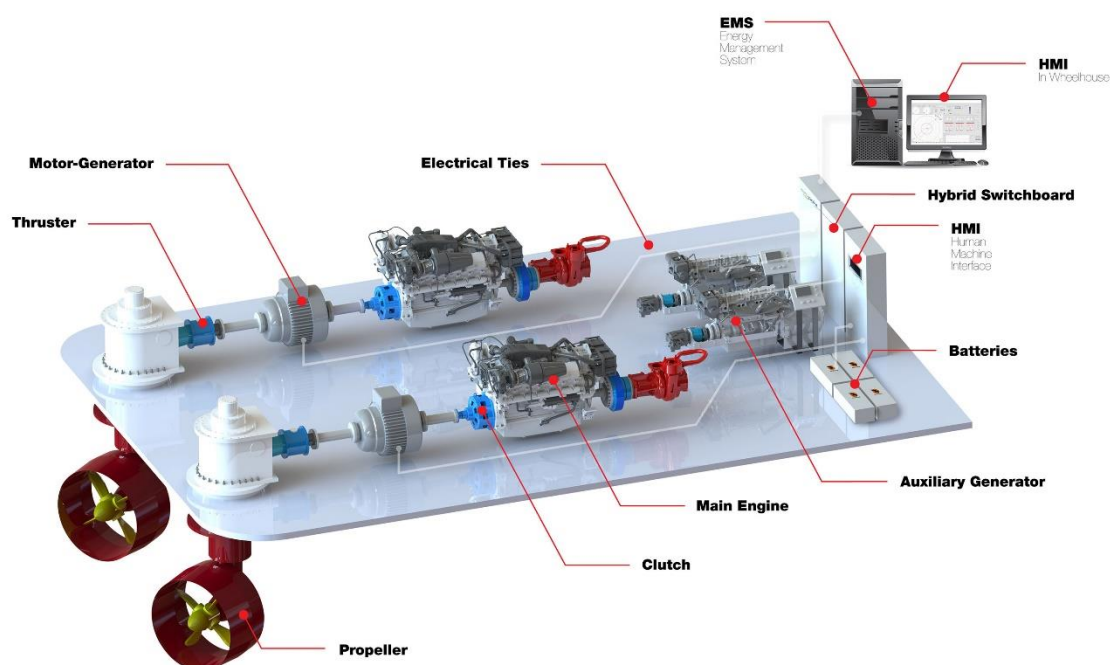
Por sua vez, o arranjo combinado ou série-paralelo combina as características de ambos os sistemas, podendo alternar entre modos puramente elétrico, exclusivamente mecânico ou misto. Essa arquitetura, segundo Radica et al. (2025), é cada vez mais recomendada para embarcações fluviais de médio e grande porte, pois oferece maior eficiência em cenários operacionais variáveis e facilita estratégias de redução de consumo específico de combustível.

A Figura 12 apresenta uma arquitetura híbrida estruturada em torno de dois motores principais de combustão interna, conjuntos motor-gerador, baterias de alta capacidade e um sistema avançado de gerenciamento de energia (EMS do inglês *Energy Management System*). Nesse arranjo, os motores principais estão conectados aos eixos propulsores por meio de embreagens (*clutches*), permitindo o desacoplamento mecânico quando não são necessários.

Os conjuntos motor-gerador exercem função dupla, podendo operar tanto como geradores, convertendo a energia mecânica proveniente dos motores térmicos em energia elétrica, quanto como motores elétricos, utilizando energia armazenada nas

baterias para acionar os propulsores (*thrusters*), conforme o modo de operação do sistema.

Figura 12 – Sistema propulsão híbrido combinado



Fonte: AKA Energy Systems.

### 3.6.2 Vantagens operacionais e ambientais da hibridização

A adoção de sistemas híbridos de propulsão em embarcações fluviais viabiliza ganhos significativos sob o ponto de vista operacional e ambiental, aspectos que se tornam críticos em hidrovias navegáveis economicamente relevantes como a Bacia Amazônica ou o sistema Paraná-Paraguai. Segundo Inal et al. (2022), um dos principais benefícios é a redução do consumo específico de combustível, uma vez que o motor de combustão pode ser mantido operando em faixa de carga ideal, enquanto variações de demanda são compensadas por bancos de baterias. Estudos apontam que essa estratégia pode gerar economia de combustível entre 10% e 30%, dependendo do perfil de operação (Vedran et al., 2025).

Outro fator destacado por Maloberti (2025) é a redução das emissões de poluentes atmosféricos, como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>). Em zonas urbanas ou áreas de preservação, a possibilidade de

operar em modo elétrico puro, durante atracações, manobras portuárias ou travessias em áreas de proteção ambiental, contribui diretamente para mitigar impactos à fauna e reduzir níveis de ruído subaquático (Radica et al., 2025).

Do ponto de vista econômico, Park e Kim (2024) ressaltam que a maior eficiência dos sistemas híbridos implica redução de custos de manutenção, já que o tempo de operação em carga mínima dos motores diesel é minimizado. Isso diminui o desgaste interno, amplia a vida útil de peças móveis e reduz a frequência de paradas para revisões.

Em empurradores fluviais, essas vantagens são amplificadas pelo regime operacional característico, marcado por grande variação de carga, operações de empurrar comboios extensos e necessidade de reversões frequentes. Nessa perspectiva, a hibridização torna-se uma ferramenta estratégica para garantir desempenho energético superior e conformidade ambiental alinhada a normas como a Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição Causada por Navios (MARPOL do inglês *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*), Anexo VI e o Índice de Eficiência Energética de Projeto (EEDI do inglês *Energy Efficiency Design Index*) (Inal et al., 2022).

### **3.6.3 Tecnologias envolvidas: motores elétricos, inversores, baterias de íon-lítio**

Para viabilizar a operação híbrida em empurradores fluviais, torna-se essencial compreender os principais componentes tecnológicos envolvidos. Um dos elementos centrais é o motor elétrico, cuja evolução recente trouxe máquinas de ímã permanente e motores de indução trifásicos altamente eficientes, capazes de operar em regimes de torque elevado mesmo em baixas rotações (Meirelles, 2013; Park et al., 2024). Tais características são fundamentais para manobras portuárias e para momentos de baixa demanda, quando o motor elétrico substitui total ou parcialmente o diesel.

O funcionamento desses motores depende diretamente de inversores de frequência, dispositivos eletrônicos responsáveis por converter a corrente contínua (CC) armazenada em baterias em corrente alternada (CA), ajustando a frequência e a tensão de acordo com o regime de operação requerido pelo propulsor. A integração de inversores de última geração permite controle fino da rotação e do torque, otimizando o desempenho do motor elétrico em cenários dinâmicos. (Vedran et al., 2025)

No que tange ao armazenamento de energia, as baterias de íon-lítio destacam-se como a solução predominante devido à sua alta densidade energética, vida útil prolongada e capacidade de suportar ciclos profundos de carga e descarga sem degradação rápida (Radica et al., 2025).

Complementando o arranjo, os sistemas de gerenciamento de energia (EMS do inglês *Energy Management System*), são responsáveis por monitorar o estado de carga das baterias, definir estratégias de despacho de potência entre motores diesel e módulos elétricos e garantir que o sistema opere dentro de parâmetros de segurança e eficiência (Inal et al., 2022). A aplicação de algoritmos de controle avançado, como o Estratégia de Minimização do Consumo Equivalente (ECMS do inglês *Equivalent Consumption Minimization Strategy*), possibilita otimização em tempo real, ajustando continuamente o fluxo de energia com base em dados de carga, velocidade e condições ambientais (Park; 2024).

#### **3.6.4 Aplicações em embarcações fluviais: estudos de caso e tendências tecnológicas**

Estudos de caso recentes confirmam o potencial de viabilidade técnica dos sistemas híbridos aplicados a embarcações fluviais. Radica et al. (2025) relatam a experiência de rebocadores híbridos em operação em canais europeus, destacando redução de até 40% nas emissões totais de CO<sub>2</sub> em operações de manobra e cruzeiro em baixa velocidade.

Park e Kim (2024) ilustram, por meio de simulação, um sistema integrado de gerador diesel com banco de baterias de alta capacidade, capaz de garantir propulsão em modo elétrico por períodos superiores a 2 horas, suficiente para manobras portuárias e navegação em áreas restritas.

No contexto brasileiro, Peixoto (2022) apresenta a modelagem de um sistema híbrido para um empurrador de médio porte operando na Amazônia, onde variações sazonais de vazão dos rios impõem desafios adicionais ao dimensionamento de potência. Os resultados indicaram potencial de economia anual de combustível superior a 12% e redução proporcional de emissões de poluentes atmosféricos.

A perspectiva futura aponta para a adoção de baterias de estado sólido, inversores de maior eficiência e sistemas de controle baseados em inteligência artificial para

ajustar, em tempo real, os modos de operação de forma totalmente autônoma (Vedran et al., 2025).

Espera-se que, até 2035, parte expressiva da frota de empurradores que operam em regiões economicamente estratégicas da América do Sul conte com arranjos híbridos de série-paralelo, compatíveis com metas de descarbonização previstas no Plano IMO 2050 (Inal et al., 2022).

Além dos estudos de caso regionais, existem exemplos internacionais que mostram como a propulsão híbrida já é uma realidade prática e viável. Um caso de destaque é o novo ferry Stena RoRo E-Flexer, entregue em 2024 para operar na Europa. Este navio foi projetado para usar gás natural liquefeito (GNL) como combustível principal e, ao mesmo tempo, conta com um grande sistema elétrico de apoio. A Figura 13 apresenta o maior sistema de baterias já instalado em um navio comercial, com capacidade suficiente para viabilizar manobras portuárias e a navegação em trechos curtos sem o acionamento do motor a combustão, evidenciando o potencial da hibridização em operações reais (Offshore Energy, 2024).

Figura 13 – Pacote híbrido de bateria de 12 MWh



Fonte: Stena RoRo (2024).

Essa combinação permite reduzir bastante o uso de combustíveis fósseis e cortar as emissões de poluentes, principalmente em áreas costeiras onde as regras ambientais são cada vez mais rígidas. Nesse contexto, a Figura 14 apresenta embarcações da frota da Brittany Ferries que adotam sistemas de propulsão híbrida, evidenciando a aplicação prática dessas soluções em operações comerciais regulares

e em ambientes sujeitos a restrições ambientais severas. Por isso, o E-Flexer serve de inspiração para embarcações fluviais no Brasil que também buscam ser mais econômicas, limpas e silenciosas.

Figura 14 – Brittany Ferries



Fonte: Offshore Energy (2024).

### 3.7 Emissões atmosféricas na navegação

O setor naval, vital para o comércio global, enfrenta desafios ambientais crescentes devido às suas emissões de gases de efeito estufa, poluição atmosférica e impactos nos ecossistemas marinhos. Essa realidade exige a adoção urgente de práticas sustentáveis que equilibrem desenvolvimento econômico e preservação ambiental, especialmente considerando que a maior parte das emissões ocorre em regiões costeiras, afetando diretamente a qualidade do ar e a saúde pública.

#### 3.7.1 Principais poluentes emitidos por motores marítimos: $CO_2$ , $NO_x$ , $SO_x$ , MP

Os motores marítimos convencionais, especialmente aqueles que operam com combustíveis fósseis de origem mineral, como óleo combustível pesado (HFO do inglês Heavy Fuel Oil) e o óleo diesel marítimo (MGO do inglês Marine Gas Oil), são fontes significativas de emissão de poluentes atmosféricos. Os principais contaminantes liberados por esses motores durante o processo de combustão incluem dióxido de

carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) e material particulado (MP).

Esses poluentes apresentam impactos tanto locais quanto globais. Enquanto os compostos como o NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> e o material particulado afetam diretamente a qualidade do ar em áreas costeiras ou regiões portuárias, o CO<sub>2</sub> contribui significativamente para o aquecimento global. Em termos quantitativos, as emissões de dióxido de carbono provenientes da navegação representam cerca de 3,3% das emissões globais desse gás, segundo estimativas apresentadas pela IMO (MEPC 59/INF.10), conforme citado por Zanella (2018, p. 304).

As elevadas emissões de NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub> decorrem diretamente da composição dos combustíveis utilizados. O teor de enxofre presente nos óleos combustíveis utilizados por navios pode ser até 2.700 vezes maior que o diesel automotivo convencional (MIOLA et al., 2010, apud Zanella, 2018, p. 303). Além disso, estima-se que o setor marítimo foi responsável, já em 2005, por 27% das emissões globais de NO<sub>x</sub> e por 10% das de SO<sub>x</sub> (Zanella, 2018, p. 304).

Complementando, Zanella (2018) destaca que as emissões de CO<sub>2</sub>, agravadas pelos níveis crescentes de NO<sub>x</sub> oriundos do transporte marítimo internacional, têm alto potencial de contribuir para o aquecimento global, a ponto de se alcançar um “ponto sem retorno”, caso não haja mudanças na direção das políticas ambientais vigentes.

Desse modo, os motores marítimos configuram uma das maiores fontes de poluição atmosférica proporcional ao consumo de combustível. A queima dos combustíveis fósseis navais, além de emitir grandes volumes de CO<sub>2</sub>, gera produtos secundários como o ozônio troposférico e partículas finas (PM<sub>2.5</sub>), os quais são associados a riscos elevados à saúde humana, como doenças respiratórias e cardiovasculares, especialmente em zonas portuárias densamente povoadas.

### **3.7.2 Fatores de emissão conforme IMO (2020) e IPCC (2006)**

Conforme estabelecido na Organização Marítima Internacional (IMO, 2020), por meio do Anexo VI da MARPOL 73/78, foram definidos limites rigorosos para as emissões atmosféricas oriundas de motores marítimos, com o objetivo de reduzir os impactos ambientais gerados pelas operações de navegação. O referido anexo regulamenta as emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) e

compostos orgânicos voláteis (VOC), impondo limites máximos e parâmetros específicos para motores diesel marítimos, bem como para o teor de enxofre dos combustíveis utilizados. As informações apresentadas nesta seção foram baseadas em dados da Organização Marítima Internacional (IMO do inglês *International Maritime Organization*) (2020) e Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição Causada por Navios (MARPOL do inglês *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*), Anexo VI.

No que se refere aos óxidos de nitrogênio, os motores são classificados em três categorias, definidas a partir do ano de construção das embarcações e da rotação nominal dos motores ( $n$ ). Para cada faixa de rotação, são estipulados valores máximos de emissão expressos em gramas por quilowatt-hora (g/kWh).

A Categoria I, apresentada na Tabela 2, aplica-se a motores diesel marítimos instalados em navios construídos entre 1º de janeiro de 2000 e 31 de dezembro de 2010. Os limites de emissão variam em função da rotação nominal do motor.

Tabela 2 – Limites de emissão de  $\text{NO}_x$  para motores da Categoria I

<b>Faixa de rotação nominal (rpm)</b>	<b>Limite máximo (g/kWh)</b>
<b>&lt; 130 rpm</b>	17,0
<b><math>130 \leq n &lt; 2.000</math> rpm</b>	$45 \cdot n^{(-0,2)}$
<b><math>\geq 2.000</math> rpm</b>	9,8

Fonte: Adaptado pela autora (2025).

A Categoria II, cujos valores são detalhados na Tabela 3, refere-se a motores instalados em navios construídos a partir de 1º de janeiro de 2011. Observa-se, nesta categoria, um endurecimento progressivo dos limites de emissão em relação à categoria anterior.

Tabela 3 – Limites de emissão de  $\text{NO}_x$  para motores da Categoria II

<b>Faixa de rotação nominal (rpm)</b>	<b>Limite máximo (g/kWh)</b>
<b>&lt; 130 rpm</b>	14,4
<b><math>130 \leq n &lt; 2.000</math> rpm</b>	$44 \cdot n^{(-0,23)}$
<b><math>\geq 2.000</math> rpm</b>	7,7

Fonte: Adaptado pela autora (2025).

Por fim, a Categoria III, explicitada na Tabela 4, contempla motores instalados em navios construídos a partir de 1º de janeiro de 2016, quando operando em Áreas de Controle de Emissão (ECAs do inglês *Emission Control Areas*). Nesta categoria, os limites são ainda mais restritivos, demandando soluções tecnológicas mais avançadas.

Tabela 4 – Limites de emissão de NO<sub>x</sub> para motores da Categoria III

<b>Faixa de rotação nominal (rpm)</b>	<b>Limite máximo (g/kWh)</b>
<b>&lt; 130 rpm</b>	3,4
<b>130 ≤ n &lt; 2.000 rpm</b>	9 · n <sup>(-0,2)</sup>
<b>≥ 2.000 rpm</b>	2,0

Fonte: Adaptado pela autora (2025).

Além dos parâmetros para NO<sub>x</sub>, o Anexo VI da MARPOL impõe restrições específicas quanto ao teor de enxofre dos combustíveis marítimos, visando à redução das emissões de SO<sub>x</sub> e de partículas finas provenientes da combustão de óleo combustível pesado. O teor de enxofre permitido passou por reduções graduais, em alinhamento com os compromissos globais de controle da poluição atmosférica proveniente da navegação.

O histórico de evolução desses limites pode ser observado na Tabela 5, que apresenta os valores globais e os valores aplicáveis às Áreas de Controle de Emissão (ECAs). Desde 1º de janeiro de 2020, o limite global foi reduzido para 0,50% m/m, enquanto nas ECAs o limite máximo permanece em 0,10% m/m, conforme vigente desde 1º de janeiro de 2015.

Tabela 5 – Evolução dos limites máximos de teor de enxofre no óleo combustível

<b>Período</b>	<b>Limite Global (%)</b>	<b>Limite em Áreas de Controle de Emissão (%)</b>
<b>Antes de 1º jan. 2012</b>	4,50	1,50 (até jun. 2010) / 1,00 (a partir jul. 2010)
<b>1º jan. 2012 – 31 dez. 2019</b>	3,50	0,10 (a partir de jan. 2015)
<b>A partir de 1º jan. 2020</b>	0,50	0,10

Fonte: Adaptado pela autora (2025).

Para assegurar a conformidade com esses parâmetros, as embarcações devem manter registros documentais sobre o teor de enxofre do combustível adquirido, além de dispor de procedimentos operacionais que garantam a troca de óleo combustível antes de ingressar em ECAs, evitando a contaminação dos sistemas de alimentação. Quando necessário, é permitido o emprego de tecnologias de abatimento, como lavadores de gases de exaustão (*scrubbers*), desde que a emissão final equivalente atenda aos padrões regulamentares.

A Figura 15 apresenta as principais Áreas de Controle de Emissão em vigor ou em análise, evidenciando o Mar Báltico e o Mar do Norte (em azul), a costa leste da América do Norte (em verde) e outras zonas em fase de estudo para regulamentação (em cinza).

Figura 15 – Áreas de Controle de Emissão (ECAs) vigentes no mundo



Fonte: CETO (2024).

Dessa forma, o cumprimento das normas referentes aos limites de emissão de  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_x$  constitui elemento fundamental no dimensionamento de sistemas híbridos de propulsão para empurradores, pois tais sistemas devem ser projetados não apenas para eficiência energética, mas também para assegurar o atendimento integral aos padrões ambientais internacionais vigentes.

### 3.7.3 Fórmulas e coeficientes para cálculo de emissões

O cálculo das emissões atmosféricas associadas à operação de empurradores híbridos envolve parâmetros definidos por normas internacionais, em especial a Resolução MEPC.364(79), que estabelece diretrizes para o cálculo do Índice de Eficiência Energética de Projeto (EEDI), e o Anexo VI da MARPOL 73/78, que regulamenta limites de emissão de poluentes como NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub> (IMO, 2022).

Em termos gerais, a emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) proveniente da combustão de combustíveis fósseis é estimada pela multiplicação da quantidade total de combustível consumido por um coeficiente de conversão de carbono em CO<sub>2</sub>, específico para cada tipo de combustível. Essa abordagem está consolidada nas diretrizes do IPCC (2006), amplamente adotada pela IMO em seus cálculos normativos (IMO, 2022).

A emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) foi calculada a partir do consumo de combustível e do fator de emissão correspondente, conforme a Equação (1).

$$E_{CO_2} = FC * EF_{CO_2} \quad (1)$$

Onde:

- $E_{CO_2}$  = emissão total de dióxido de carbono (kg CO<sub>2</sub>/ano);
- FC = consumo anual de combustível (kg/ano);
- $EF_{CO_2}$  = fator de emissão de dióxido de carbono (kgCO<sub>2</sub>/kg combustível).

### 3.7.4 Normas internacionais de controle de emissões no setor marítimo

Diante dos desafios impostos pelos impactos ambientais do transporte marítimo, a Organização Marítima Internacional tem estabelecido, ao longo das últimas décadas, regulamentações cada vez mais rigorosas com o objetivo de mitigar os efeitos adversos da navegação sobre o meio ambiente. A principal dessas regulamentações é a Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios, adotada em 17 de fevereiro de 1973, posteriormente modificada pelo Protocolo de 1978, passando a vigorar a partir de outubro de 1983, em substituição à antiga Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição do Mar por Óleo de 1954 (Carvalho, 2014).

Atualmente, a MARPOL é composta por seis anexos, cada um voltado para um tipo específico de poluição marítima, conforme apresentado na Tabela 6 (Aslan, 2017).

Tabela 6 – Anexos MARPOL.

<b>Anexo I</b>	Prevenção da poluição por óleo;
<b>Anexo II</b>	Substâncias líquidas nocivas transportadas a granel;
<b>Anexo III</b>	Substâncias perigosas embaladas;
<b>Anexo IV</b>	Efluentes sanitários (esgoto);
<b>Anexo V</b>	Resíduos sólidos (lixo);
<b>Anexo VI</b>	Poluição atmosférica (controle de emissões de SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> e GEE).

Fonte: Adaptado de Aslan (2017).

A partir de 1997, com a inclusão do Anexo VI, foram definidos limites específicos para a emissão de poluentes atmosféricos provenientes das embarcações, especialmente óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e gases de efeito estufa (GEE). O Anexo VI da Convenção tem como principal objetivo mitigar e/ou anular os impactos ambientais causados pelos gases provenientes da operação de navios, independentemente de sua origem a bordo, por meio do controle da emissão de substâncias para a atmosfera (Carvalho, p. 17).

Para viabilizar o cumprimento desses limites, a IMO instituiu instrumentos complementares de monitoramento e gestão da eficiência energética, como apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Ferramentas de limites de poluentes

<b>EEDI (Energy Efficiency Design Index)</b>	Que estabelece um índice de eficiência energética para novos projetos de navios;
<b>SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan)</b>	Plano de gestão da eficiência energética operacional das embarcações;
<b>EEOI (Energy Efficiency Operational Indicator)</b>	Indicador que permite o monitoramento das emissões operacionais de CO <sub>2</sub> .

Fonte: Adaptado pela autora (2025).

Apesar dos avanços regulatórios, essas diretrizes ainda são alvo de críticas, principalmente por limitações relacionadas à abrangência dos indicadores de gases de efeito estufa. O EEOI, por exemplo, considera apenas as emissões geradas durante a operação da embarcação, desconsiderando as emissões associadas à produção, transporte e distribuição dos combustíveis. Tal lacuna pode distorcer a percepção da real eficácia das estratégias de mitigação adotadas no setor (Seithe et al., 2020).

### **3.8 Sustentabilidade e descarbonização no transporte aquaviário**

A busca por sustentabilidade no transporte aquaviário tornou-se essencial diante das metas globais de redução de emissões. A descarbonização do setor exige o uso de tecnologias mais limpas, combustíveis alternativos e sistemas energéticos eficientes, capazes de reduzir a dependência de fontes fósseis e minimizar os impactos ambientais das operações marítimas e fluviais.

#### ***3.8.1 Créditos de carbono como instrumento de mitigação no setor naval***

Diante da crescente preocupação global com as mudanças climáticas e os impactos ambientais decorrentes das atividades econômicas, surgem os mercados de créditos de carbono, um dos principais instrumentos econômicos de combate às emissões de gases de efeito estufa (GEE). Este mecanismo permite que empresas ou nações que consigam reduzir suas emissões abaixo de determinados limites vendam esse excedente de redução na forma de créditos para outros agentes que não conseguiram atingir suas metas (Goularte et al., 2011).

Esse mecanismo foi consolidado com o Protocolo de Kyoto, por meio do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), e atualmente é ampliado pelo Acordo de Paris e pelos mercados voluntários. O objetivo é promover uma compensação das emissões, criando um equilíbrio entre desenvolvimento econômico e sustentabilidade ambiental (Souza, 2013).

No setor naval, essa discussão se torna cada vez mais relevante. A indústria enfrenta não só as restrições ambientais, como a Organização Marítima Internacional (IMO do inglês International Maritime Organization) 2020, que limita o teor de enxofre dos combustíveis, mas também a crescente pressão econômica por parte dos

mercados de carbono. Assim, operadores que investem em tecnologias sustentáveis, como propulsão híbrida, uso de biocombustíveis e eletrificação parcial, reduzem suas emissões e, conseqüentemente, sua dependência da compra de créditos de carbono.

Dessa forma, além de ser uma obrigação ambiental, a redução das emissões passa a ser também uma estratégia econômica, que melhora a competitividade das embarcações, minimiza custos futuros com carbono e atende às exigências de mercados internacionais cada vez mais focados em sustentabilidade (Goularte et al., 2011).

Diante desse cenário, torna-se evidente que os créditos de carbono representam não apenas uma estratégia ambiental, mas um elemento econômico central na viabilidade dos projetos de descarbonização no setor naval. Dessa forma, a adoção de sistemas de propulsão híbrida, como proposto neste trabalho, não apenas contribui para a mitigação das emissões, mas também posiciona as embarcações dentro de uma lógica econômica sustentável, resiliente e alinhada às exigências do mercado global e das futuras regulações ambientais.

### **3.8.2 Evolução tecnológica e perspectivas futuras**

O setor naval vive um momento de profunda transformação, impulsionado por pressões ambientais, econômicas e regulatórias. O avanço das políticas globais de descarbonização, como a IMO 2020, o fortalecimento dos mercados de carbono e o crescente rigor das metas ambientais até 2050, têm forçado a indústria a buscar soluções tecnológicas que conciliem eficiência operacional e sustentabilidade.

Historicamente, a matriz energética da navegação foi sustentada por combustíveis altamente poluentes, como o óleo combustível pesado (HFO do inglês Heavy Fuel Oil) e óleo diesel marítimo (MGO do inglês Marine Gas Oil), que, apesar do baixo custo, são responsáveis por emissões elevadas de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> e material particulado (Gucma, 2025).

Esse modelo, além de ambientalmente insustentável, torna-se economicamente arriscado diante da consolidação dos mercados de carbono, onde operadores que não reduzirem suas emissões precisarão adquirir créditos para compensação (Goularte et al., 2011).

Além dos avanços nos sistemas de propulsão, tecnologias digitais estão sendo incorporadas às operações navais. A utilização de inteligência artificial (IA), *machine*

*learning* e sistemas de gestão energética embarcados permite otimizar rotas, ajustar o consumo de energia em tempo real e reduzir custos operacionais, além de maximizar o desempenho ambiental das embarcações (Maloberti et al., 2025).

Contudo, apesar dos avanços, persistem desafios técnicos e econômicos. O custo de aquisição de sistemas híbridos, baterias de grande porte e motores de combustíveis alternativos ainda é elevado. Soma-se a isso a necessidade de expansão da infraestrutura portuária para abastecimento de combustíveis limpos e recarga de sistemas elétricos, além de uma demanda crescente por mão de obra qualificada para operação e manutenção desses novos sistemas (Vedran et al., 2025).

As perspectivas futuras indicam que a tendência é de consolidação de modelos operacionais cada vez mais eficientes, com redução drástica das emissões. O avanço de tecnologias como baterias de estado sólido, a popularização do hidrogênio verde e a consolidação dos mercados de carbono devem acelerar a transição energética no setor. Nesse cenário, embarcações que investirem em tecnologias sustentáveis não apenas atenderão às regulamentações internacionais, mas também se tornarão mais competitivas, com menores custos operacionais e maior valor agregado no mercado global (Goulart et al., 2011).

Portanto, a evolução tecnológica da indústria naval não é mais uma opção, mas uma exigência para a sustentabilidade econômica, ambiental e social do setor. Os sistemas de propulsão híbrida, tema central deste trabalho, surgem como um caminho estratégico e indispensável na construção de um transporte marítimo mais limpo, eficiente e preparado para os desafios do futuro.

Nesse cenário de transformação, os empurradores fluviais, que operam em ambientes de alta sensibilidade ambiental, tornam-se candidatos ideais para a adoção de sistemas híbridos, devido à sua demanda operacional intermitente, manobras constantes e permanência em áreas urbanas e costeiras.

## 4 METODOLOGIA

A presente pesquisa adota uma abordagem técnico-científica voltada à análise comparativa entre dois sistemas de propulsão naval: a configuração convencional, baseada exclusivamente em motores a combustão interna alimentados por combustíveis fósseis, e uma proposta alternativa com sistema híbrido, que inclui motor elétrico acoplado à linha de eixo de um empurrador fluvial com tração estática (*bollard pull*), com potência instalada de 4.800 kW e capacidade de 60 toneladas.

A metodologia aqui empregada contempla uma análise sistêmica, baseada na engenharia mecânica e naval, visando identificar o impacto técnico e ambiental da substituição parcial do sistema de propulsão convencional por uma solução híbrida. Essa abordagem é fundamentada em dados reais da embarcação em estudo e na aplicação de parâmetros normativos de desempenho, eficiência energética e emissões atmosféricas.

Para atingir os objetivos propostos, o trabalho será estruturado em etapas que incluem a caracterização da configuração atual da embarcação, a avaliação do desempenho energético com base nos motores atuais, o dimensionamento de um sistema híbrido compatível com as exigências operacionais do empurrador e, por fim, a comparação entre os dois cenários quanto a consumo de combustível, emissões e eficiência geral. Como base técnica e regulatória, serão utilizadas diretrizes da Organização Marítima Internacional (IMO, 2020), normas ISO aplicáveis, além de literatura especializada em sistemas de propulsão naval (Andrade; Martins, 2021).

A seguir, são descritos os métodos e critérios adotados em cada fase da pesquisa.

### 4.1 Tipo de Pesquisa

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de natureza quantitativa e qualitativa, com abordagem exploratória e descritiva, do tipo estudo de caso técnico. A pesquisa aplicada é apropriada quando se busca gerar conhecimentos com o objetivo de solucionar problemas específicos e práticos, especialmente relacionados a melhorias tecnológicas e operacionais, como é o caso da introdução de sistemas híbridos em embarcações fluviais (Gil, 2017).

A abordagem quantitativa é evidenciada na análise energética, no dimensionamento do sistema híbrido e na estimativa de emissões de poluentes atmosféricos, os quais serão calculados com base em dados técnicos da embarcação e modelos matemáticos de eficiência energética. Já a dimensão qualitativa está presente na interpretação dos impactos ambientais e operacionais da substituição parcial do sistema de propulsão, considerando aspectos como viabilidade técnica, manutenção e aderência normativa.

A pesquisa também possui caráter exploratório, pois busca investigar um tema ainda incipiente na realidade da navegação interior brasileira, a hibridização de empurradores, reunindo informações a partir de bases teóricas e especificações técnicas de fabricantes de motores e equipamentos. Além disso, trata-se de uma pesquisa descritiva, uma vez que tem como objetivo principal descrever e analisar a configuração atual da embarcação e propor uma alternativa tecnológica, por meio do levantamento de parâmetros técnicos e ambientais.

O estudo de caso concentra-se em uma embarcação específica do tipo empurrador fluvial, com 60 toneladas de tração estática (*bollard pull*), e com potência instalada de 4.800 kW, operando com motores convencionais. Tal escolha permite uma análise profunda e contextualizada do problema, reforçando a aplicabilidade prática da proposta metodológica adotada.

Conforme Lakatos e Marconi (2003), o estudo de caso é um método apropriado quando se deseja investigar com profundidade um fenômeno contemporâneo inserido em seu contexto real, especialmente quando os limites entre o fenômeno e o contexto não são claramente definidos, o que se aplica ao cenário de operação energética em sistemas de propulsão fluvial.

## **4.2 Estratégia de abordagem**

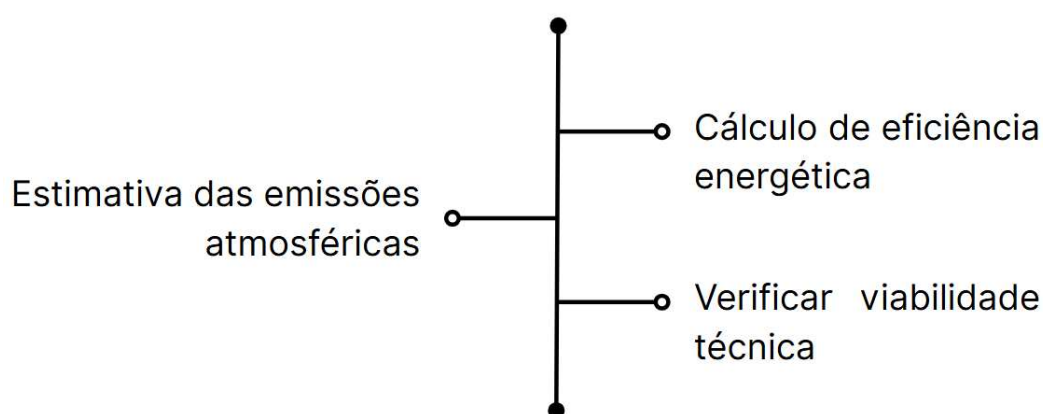
A estratégia de abordagem adotada neste trabalho baseia-se na aplicação de um método comparativo, apoiado em fundamentos da engenharia mecânica e naval, com ênfase em avaliação energética e análise de impacto ambiental. A comparação será realizada entre a configuração convencional de propulsão diesel e uma proposta alternativa, com integração de propulsão elétrica na linha de eixo da embarcação analisada.

A caracterização da configuração vigente considerará dados reais da embarcação empurradora estudada, incluindo parâmetros construtivos, capacidades volumétricas, características do sistema propulsivo e consumo energético. Com base nesses dados, será realizada a determinação do regime operacional típico da embarcação, contemplando potência média demandada, tempo de operação contínua, consumo específico de combustível (g/kWh) e estimativas de emissões de poluentes, conforme padrões estabelecidos pela ISO 8178-1 (ISO, 2020) e pelos requisitos de controle de emissões da IMO (IMO, 2020).

Na etapa seguinte, será definida uma arquitetura de propulsão híbrida por meio do acoplamento de motores elétricos na linha de eixo, trabalhando em conjunto com os motores diesel já instalados. Essa configuração permitirá o funcionamento alternado ou combinado dos sistemas de propulsão, dependendo do regime operacional e da demanda de potência.

A Figura 16 sintetiza a estratégia de abordagem do estudo, destacando os três eixos que orientam a avaliação comparativa entre os cenários analisados.

Figura 16 – Fluxograma da estratégia de abordagem do estudo



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Conforme indicado na Figura 16, a avaliação comparativa será conduzida a partir de três eixos principais:

Eficiência energética – análise do consumo total de energia nos cenários, considerando a mesma condição operacional;

Impacto ambiental – estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> e outros gases, com base nos fatores de emissão para os combustíveis óleo combustível pesado (HFO do inglês *Heavy Fuel Oil*) e óleo diesel marítimo (MGO do inglês *Marine Gas Oil*).

Viabilidade técnica – discussão sobre os desafios de integração, limitações físicas, interferência na linha de eixo e implicações operacionais, incluindo a manutenção e confiabilidade do sistema híbrido.

O objetivo dessa estratégia é proporcionar uma avaliação crítica e fundamentada da aplicabilidade de um sistema híbrido em empurradores fluviais, quantificando ganhos ambientais e propondo caminhos para futuras melhorias tecnológicas no setor de navegação interior. A abordagem visa ainda demonstrar como modificações estruturais e tecnológicas podem representar significativas reduções nas emissões e no consumo de combustível, contribuindo para a transição energética do setor marítimo.

Para garantir rastreabilidade e reprodutibilidade, os dados completos e o detalhamento dos cálculos empregados nas comparações entre os cenários analisados estão disponíveis nos apêndices deste trabalho.

### **4.3 Descrição da configuração atual da embarcação**

O barco em questão é um empurrador fluvial de grande dimensão, do modelo LDC 6400, fabricado por um estaleiro localizado no estado do Ceará. Ele foi concebido para realizar operações em rios com alta exigência logística, como os da região amazônica. Esse tipo de embarcação exerce uma função essencial no transporte de granéis sólidos e líquidos, servindo como unidade propulsora de comboios constituídos por múltiplas barcaças. A função requer um alto nível de empuxo, confiabilidade na operação e habilidade de manobra, uma vez que atua em trechos de navegação que apresentam restrições de calado, curvaturas acentuadas e variações significativas na correnteza.

A propulsão do empurrador é garantida por meio de três motores principais Wärtsilä 8L20, os quais são motores de combustão interna de quatro tempos, resfriados por água, alimentados com óleo combustível pesado e têm a capacidade de operar igualmente com óleo diesel marítimo. Cada unidade apresenta uma potência nominal de 1.600 kW a 1.000 rpm, resultando em um total de 4.800 kW de potência instalada.

O sistema de propulsão é composto por três propulsores azimutais Schottel SRP 1215 FP, comumente chamados de Z-Drives, os quais estão ligados diretamente aos

motores principais através das linhas de eixo. Cada motor de propulsão possui um azimutal de hélice de passo fixo, composta por cinco pás, fabricada em uma liga de bronze-alumínio, com um diâmetro de 2.150 mm, capaz de gerar um empuxo elevado com eficiência em condições de carga contínua. Essa disposição de propulsão azimutal proporciona ao empurrador uma manobrabilidade aprimorada, qualidade essencial em operações de comboio de grande dimensão.

A Figura 17 apresenta uma imagem ilustrativa da disposição dos principais equipamentos na praça de máquinas do empurrador, permitindo uma visualização geral do arranjo:

Bombas responsáveis pela transferência de combustíveis e por alimentar os sistemas auxiliares;

Purificadores de óleo combustíveis e de óleo lubrificante, assegurando a qualidade apropriada dos fluidos antes de serem utilizados em operação;

Figura 17 – Purificador de HFO e óleo lubrificante



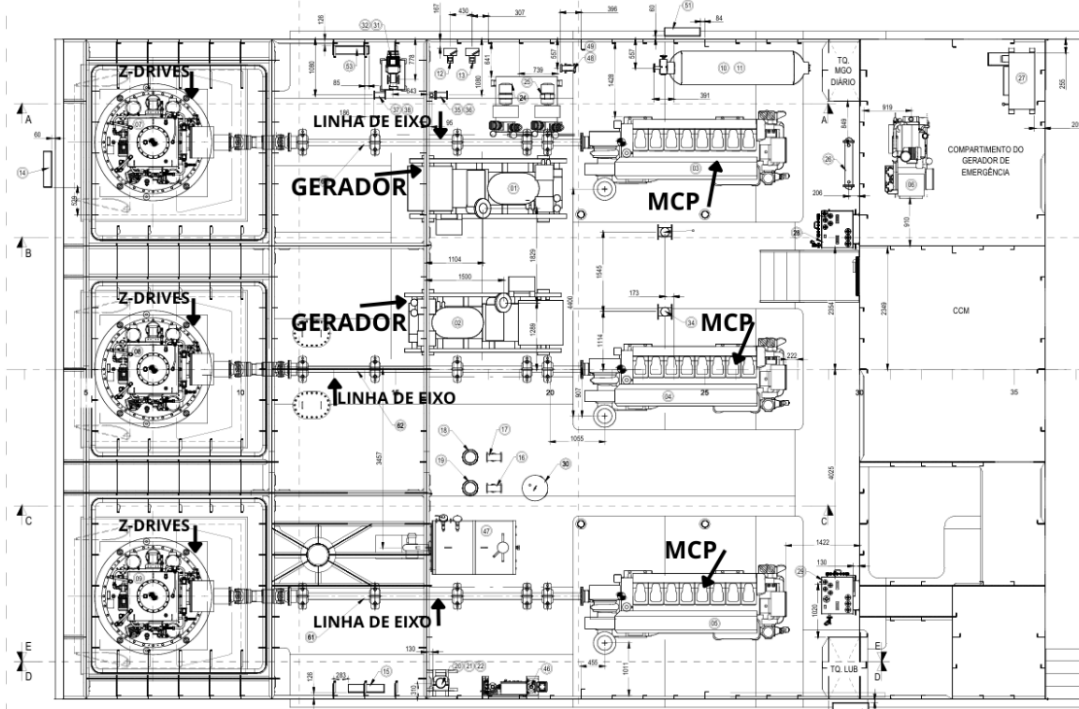
Fonte: Memorial descritivo da embarcação (2017).

Compressores de ar, utilizados tanto para a partida dos motores quanto para o acionamento de válvulas e para sistemas auxiliares;

Bombas de esgoto oleoso e separadores de óleo e água que garantem a conformidade com regulamentações ambientais.

A disposição da praça de máquinas do empurrador LDC 6400, com a localização dos principais equipamentos e sistemas auxiliares, é apresentada na Figura 18.

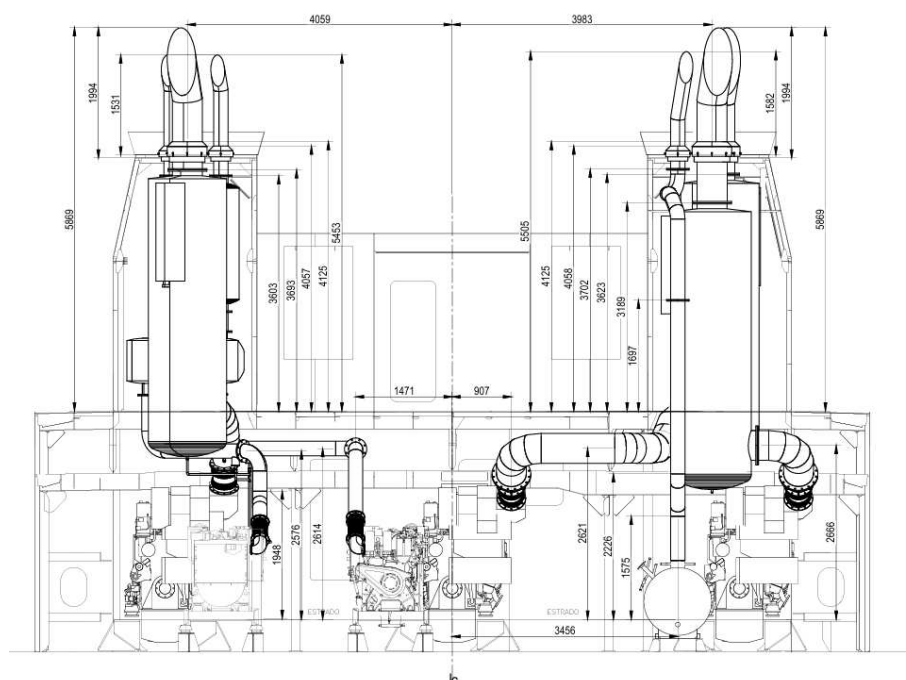
Figura 18 – Disposição da praça de máquinas do empurrador LDC 6400



Fonte: Memorial descritivo da embarcação (2017).

Ademais, a embarcação possui um sistema de exaustão concebido para direcionar os gases resultantes da combustão até a chaminé, utilizando dutos em aço carbono ASTM A106 e em aço inoxidável 316L nas partes expostas, dotados de isolamento térmico em fibra cerâmica capaz de resistir a temperaturas de até 800 °C, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 – Descargas de gases



Fonte: Memorial descritivo da embarcação (2017).

O sistema abrange silenciadores hospitalares e absorventes, desenvolvidos com a finalidade de minimizar ruídos e vibrações, visando satisfazer as normas do Anexo VI da IMO MARPOL, além de atender a critérios de conforto e segurança a bordo.

O padrão de consumo da embarcação reflete sua operação em regime contínuo. Os motores principais geralmente funcionam em uma faixa de 70% a 90% da carga nominal, assegurando um equilíbrio entre a potência disponível e a durabilidade dos componentes. Esse sistema resulta em um consumo médio anual considerável de óleo combustível pesado (HFO do inglês *Heavy Fuel Oil*), constituindo uma parte expressiva dos custos operacionais do armador. O consumo médio específico dos motores, em combinação com as propriedades do combustível, gera emissões significativas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) e material particulado (MP), o que faz da embarcação um exemplo do desafio ambiental que o setor naval fluvial enfrenta.

Assim, a descrição da configuração atual da embarcação permite compreender a complexidade de seus sistemas, bem como identificar as oportunidades de melhoria relacionadas ao desempenho energético e à redução de emissões. Esse diagnóstico

constitui a base para a avaliação energética detalhada, que será apresentada no tópico seguinte.

Dessa forma, a análise da configuração vigente da embarcação possibilita a compreensão da complexidade de seus sistemas, além de permitir a identificação das oportunidades de aprimoramento associadas ao desempenho energético e à diminuição das emissões.

#### **4.4 Coleta de dados**

Os procedimentos metodológicos empregados neste estudo foram concebidos para garantir precisão técnica, coerência analítica e rastreabilidade das informações que embasam a análise comparativa entre sistemas de propulsão convencional e híbrida. A construção da metodologia teve como base o entendimento detalhado das características reais da embarcação estudada, associado ao uso de parâmetros técnicos complementares extraídos de normas e referências reconhecidas internacionalmente, de modo a assegurar consistência aos resultados obtidos.

A coleta de dados considerou duas naturezas distintas de informação. Em primeiro lugar, utilizaram-se dados primários fornecidos pelo estaleiro responsável pela construção da embarcação analisada. Esses dados incluem informações sobre o casco, arranjo propulsivo, potência instalada, sistemas auxiliares, dimensões principais e condições operacionais típicas, obtidos por meio de plantas construtivas, memoriais descritivos e relatórios técnicos oficiais. Essas informações permitiram estabelecer um retrato técnico fiel das condições reais de operação, fundamental para a construção da base de cálculo.

Em complemento a essas informações, foram utilizados dados secundários oriundos de literatura técnica e normas internacionais, a fim de suprir lacunas de informações operacionais que não estão disponíveis diretamente no estaleiro. Esses dados incluem valores de consumo específico de combustível (SFOC do inglês *Specific Fuel Oil Consumption*), fatores de emissão para dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) e material particulado (PM), parâmetros de eficiência elétrica e perfis operacionais médios adotados em embarcações de características semelhantes. O SFOC adotado para os cálculos foi de 194 g/kWh. Os fatores de emissão foram definidos com base nas diretrizes do IPCC (2006) e da IMO (MARPOL Annex VI).

Com base nesses dados, a análise foi estruturada em três etapas. A primeira consistiu no levantamento e organização sistemática das informações técnicas da embarcação, permitindo uma avaliação energética detalhada da configuração convencional a diesel. Nessa etapa foram aplicados métodos consagrados de estimativa de consumo e emissões, considerando curvas de potência, horas anuais de operação e fatores de emissão para os combustíveis MGO e HFO.

A segunda etapa envolveu a modelagem de uma configuração híbrida alternativa, incorporando um sistema elétrico suplementar acoplado à linha de eixo. Para essa modelagem foram consideradas as restrições físicas e operacionais da embarcação, sua demanda típica de potência e hipóteses conservadoras de uso do modo elétrico: 15 % do tempo de operação anual para o sistema elétrico auxiliar e 30 % para a configuração híbrida completa com MGO. Essa abordagem conservadora foi intencionalmente adotada para evitar superestimções dos benefícios energéticos e ambientais do sistema proposto.

Por fim, a terceira etapa consistiu na análise comparativa entre a configuração convencional e a híbrida. Foram avaliados o consumo total de combustível, as emissões atmosféricas estimadas de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> e PM, além dos aspectos técnicos relacionados à integração e manutenção de sistemas híbridos em embarcações já existentes

#### **4.5 Parâmetros técnicos considerados**

Para o desenvolvimento deste estudo, foram adotados parâmetros técnicos que abrangem as principais características construtivas, operacionais e energéticas de uma embarcação do tipo empurrador fluvial. Os dados foram obtidos a partir de informações fornecidas pelo estaleiro, complementados por referências técnicas e normativas reconhecidas internacionalmente, bem como manuais dos fabricantes dos equipamentos principais. Essa abordagem híbrida assegura consistência e confiabilidade na modelagem energética, permitindo avaliar com precisão o desempenho da configuração propulsora atual, em comparação com cenários híbridos.

Essa caracterização técnica serve de base para estimativas de consumo energético, emissões atmosféricas e potencial de mitigação de gases de efeito estufa (GEE), contribuindo para uma análise comparativa realista entre os dois arranjos propulsivos.

#### 4.5.1 Dados operacionais da embarcação

Os seguintes parâmetros operacionais caracterizam a condição atual da embarcação, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Dados operacionais da embarcação.

<b>Geometria</b>	<b>Dimensões</b>
<b>Tração estática (Bollard Pull)</b>	60 t;
<b>Velocidade de serviço</b>	12 nós;
<b>Número de motores principais</b>	3;
<b>Modelo dos motores principais</b>	Wärtsilä 8L20;
<b>Potência por motor</b>	1.600 kW (total de 4.800 kW);
<b>Rotação nominal dos motores</b>	1.000 rpm;
<b>Propulsores</b>	3 x Propulsores azimutais com hélices de passo fixo;
<b>Regime operacional típico</b>	80% do tempo em carga parcial, 20% em regime de pico.

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Essas informações definem o contexto energético no qual a análise será realizada.

#### 4.5.2 Características geométricas e estruturais

As dimensões e características estruturais da embarcação influenciam diretamente no desempenho hidrodinâmico, nas exigências energéticas de propulsão e na estabilidade em operação. As principais dimensões geométricas estão listadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Dimensões geométricas do empurrador.

<b>Geometria</b>	<b>Dimensão</b>
<b>Comprimento total (LOA – Length Overall)</b>	39,60 m
<b>Boca moldada (largura máxima estrutural)</b>	18,00 m
<b>Pontal moldado (altura do casco desde a quilha até o convés)</b>	4,00 m
<b>Calado de projeto (profundidade submersa medida a partir da linha de base)</b>	3,00 m
<b>Deslocamento carregado</b>	1.624 t

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Do ponto de vista construtivo, a embarcação apresenta uma estrutura robusta, projetada para suportar as exigências mecânicas e operacionais típicas da navegação fluvial. Todos os seus principais elementos estruturais são compostos por aço naval, conforme especificado na Tabela 10:

Tabela 10 – Estrutura da embarcação.

<b>Estrutura</b>	<b>Material</b>
<b>Casco</b>	Aço
<b>Conveses</b>	Aço
<b>Anteparas</b>	Aço
<b>Superestruturas</b>	Aço
<b>Casarias</b>	Aço

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A escolha do aço como material predominante garante elevada resistência mecânica, durabilidade estrutural e boa relação custo-benefício para construção e manutenção. Ademais, tais características estruturais impactam diretamente no peso da embarcação e, conseqüentemente, na demanda de energia para propulsão, principalmente em condições de carga plena.

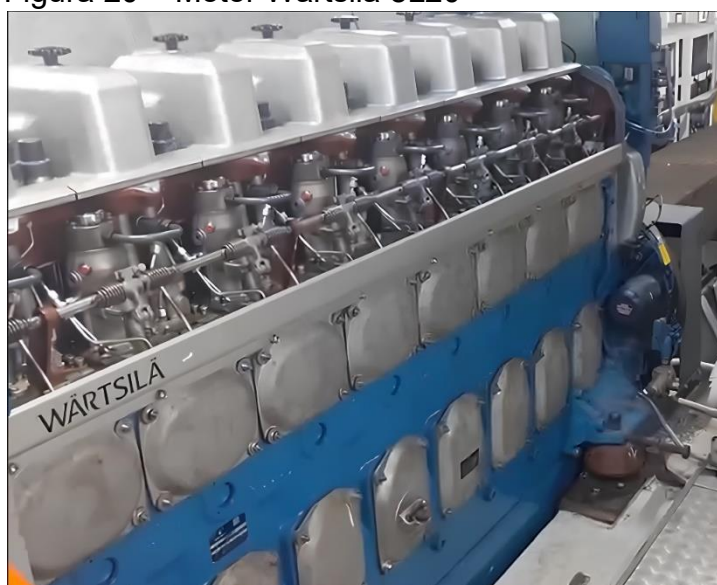
Portanto, a análise conjunta das dimensões e dos materiais utilizados na construção do empurrador é imprescindível para o desenvolvimento de uma

modelagem energética realista e precisa, considerando as forças hidrodinâmicas envolvidas, o arrasto do casco e a eficiência do sistema propulsivo (TAGGART, 1980).

#### **4.5.3 Sistema de propulsão principal**

O sistema de propulsão principal da embarcação é composto por três motores de combustão interna do tipo Wärtsilä 8L20, como mostrado na Figura 20, operando segundo o ciclo diesel e utilizando como combustível exclusivo o óleo combustível pesado (HFO do inglês *Heavy Fuel Oil*). Este tipo de combustível, amplamente empregado em aplicações marítimas de grande porte, apresenta elevada viscosidade e densidade energética. Em razão de suas propriedades físico-químicas, o HFO necessita de pré-aquecimento para alcançar uma viscosidade adequada ao processo de atomização e combustão nos motores. Para esse fim, a embarcação é equipada com uma caldeira do tipo flamotubular, apresentada na Figura 21, com pressão de vapor de 10 bar(g) e capacidade térmica de 300 kW, responsável por aquecer o combustível até as condições operacionais ideais antes da injeção nos motores.

Figura 20 – Motor Wärtsilä 8L20



Fonte: Memorial descritivo da embarcação (2017).

Figura 21 – Caldeira



Fonte: Memorial descritivo da embarcação (2017).

Cada unidade propulsora principal possui os parâmetros operacionais apresentados na Tabela 11.

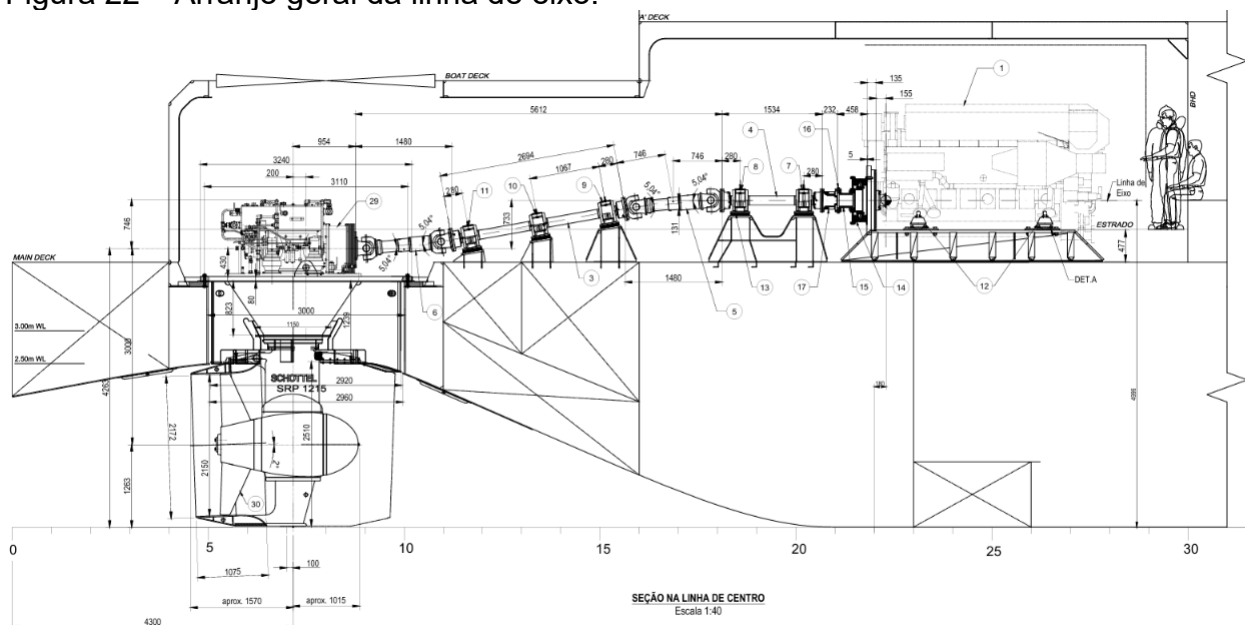
Tabela 11 – Parâmetros unidade propulsora.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valores</b>
<b>Potência máxima contínua</b>	1.600 kW
<b>Rotação nominal</b>	1.000 rpm

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Esses motores estão mecanicamente acoplados, por meio de linhas de eixo a três propulsores do tipo azimutal Schottel modelo SRP 1215 FP, conforme ilustrado na Figura 22. Tais propulsores são compostos por hélices de passo fixo instaladas dentro de tubos Kort os quais são dispositivos hidrodinâmicos em forma de anel que envolvem a hélice, projetados para aumentar a eficiência propulsiva em baixas velocidades. O tubo Kort atua como um bocal direcionador de fluxo, proporcionando maior empuxo ao canalizar a água de maneira mais uniforme através da hélice, além de reduzir a perda de energia devido a vórtices nas extremidades das pás. Esta configuração é especialmente vantajosa em embarcações de trabalho que demandam elevada tração estática, como é o caso dos empurradores fluviais.

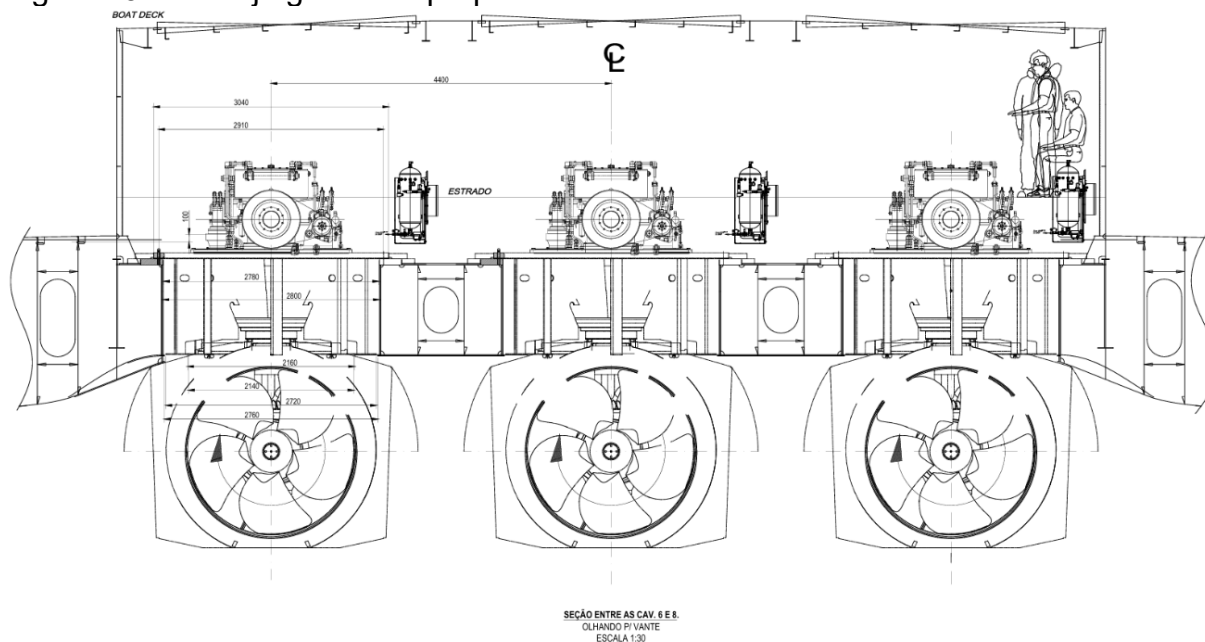
Figura 22 – Arranjo geral da linha de eixo.



Fonte: Memorial descritivo da embarcação (2017).

Na Figura 23 apresenta o arranjo geral, com a vista de vante dos propulsores.

Figura 23 – Arranjo geral dos propulsores e tubo Kort.



Fonte: Memorial descritivo da embarcação (2017).

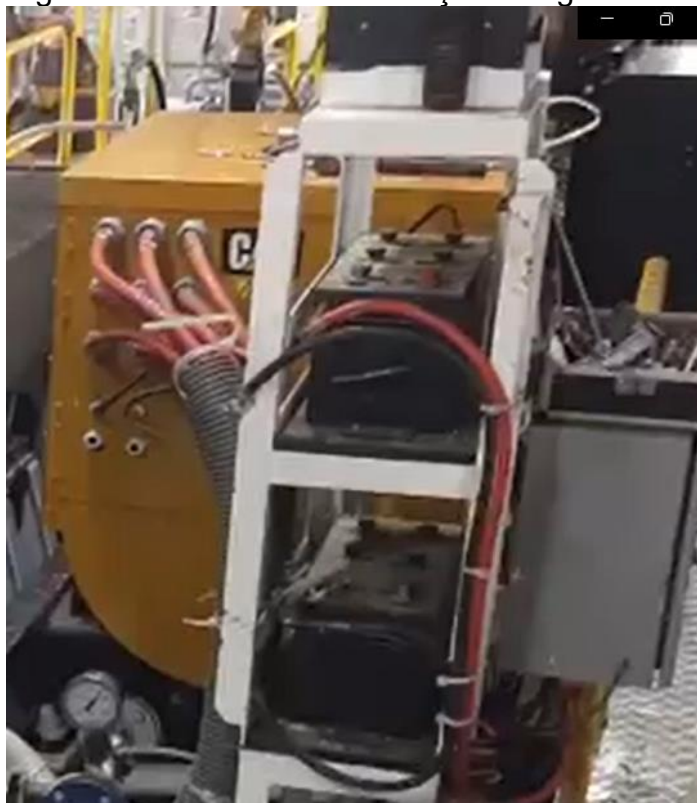
A combinação entre o sistema de motores Wärtsilä, o pré-aquecimento do HFO e a utilização de propulsores azimutais com tubos Kort garante uma operação robusta e

eficiente para navegação interior, com bom desempenho em manobras e capacidade de tração compatível com as exigências da atividade.

#### **4.5.4 Sistema de geração de energia elétrica**

O sistema de geração de energia elétrica da embarcação é composto por dois grupos geradores principais, acionados por motores a combustão interna da marca Caterpillar, modelo C18, conforme apresentado na Figura 24. Estes motores operam a uma rotação nominal de 1.800 rpm e utilizam como combustível o óleo diesel marítimo (MGO do inglês *Marine Gas Oil*), sendo este adequado à operação de motores auxiliares pela sua menor viscosidade e maior capacidade de ignição a frio, quando comparado ao HFO. Cada grupo gerador principal apresenta uma potência elétrica mínima de 340 ekW, com frequência de 60 Hz, o que garante suprimento confiável de energia para os sistemas auxiliares da embarcação, incluindo iluminação, climatização, habitabilidade, equipamentos de navegação, automação e controle, bem como suporte à operação dos propulsores azimutais, que também requerem alimentação elétrica para seus sistemas de controle e manobra.

Figura 24 – Motor de alimentação dos geradores.



Fonte: Memorial descritivo da embarcação (2017).

Complementarmente ao sistema principal, a embarcação dispõe de um grupo gerador de emergência, destinado a manter operacionais os sistemas essenciais em caso de falha na geração principal. Este gerador é acionado por um motor Caterpillar modelo C4.4, também operando a 1.800 rpm e alimentado por MGO. A potência elétrica fornecida por este grupo de emergência é de, no mínimo, 90 ekW a 60 Hz, suficiente para garantir o funcionamento de equipamentos críticos como bombas de esgoto, iluminação de segurança, comunicações, sistemas de navegação e controle de máquinas, conforme exigido pelas normas internacionais de segurança marítima.

A configuração elétrica descrita atende aos requisitos operacionais e de segurança de embarcações de médio porte utilizadas na navegação interior, assegurando a continuidade das operações mesmo em situações adversas e conferindo à embarcação elevado grau de autonomia e confiabilidade energética.

#### **4.5.5 Características dos combustíveis utilizados**

A configuração energética atual da embarcação emprega dois tipos distintos de combustíveis fósseis, os quais são utilizados de forma segmentada conforme a finalidade dos sistemas embarcados.

O primeiro combustível adotado é o óleo combustível pesado, empregado exclusivamente nos motores principais de propulsão. Trata-se de um combustível residual, de alta densidade energética, porém com elevada viscosidade e maior teor de impurezas. Para garantir sua correta atomização nos sistemas de injeção e otimizar o processo de combustão, o HFO requer aquecimento prévio, o que é realizado por meio de uma caldeira flamotubular instalada a bordo. Este procedimento reduz significativamente a viscosidade do combustível, promovendo melhor pulverização no interior das câmaras de combustão dos motores, aumentando a eficiência térmica e diminuindo a formação de depósitos carbonáceos nos componentes internos dos motores (DNV, 2020).

Na Figura 25, é apresentada a tubulação pela qual circula o HFO, já previamente aquecido. Nota-se que, ao redor da tubulação, existe um isolamento térmico com a finalidade de prevenir a dissipação de calor.

Figura 25 – Sistema de passagem do HFO aquecido



Fonte: Memorial descritivo da embarcação (2017).

O segundo combustível utilizado é o óleo diesel marítimo, aplicado na alimentação dos grupos geradores, nos sistemas auxiliares e nos conjuntos azimutais acoplados mecanicamente aos motores de propulsão. O MGO, por ser um destilado leve, apresenta menor viscosidade e maior pureza em comparação ao HFO, além de não requerer processos prévios de aquecimento. Essas características tornam o MGO mais apropriado para aplicações que exigem resposta rápida, confiabilidade operacional e facilidade de manuseio em sistemas com maior variabilidade de carga.

A seleção e o uso combinado desses combustíveis impactam diretamente nas emissões atmosféricas da embarcação, principalmente no que se refere à liberação de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) e material particulado (MP). Esses poluentes, cujos níveis de emissão estão associados à composição do combustível e à eficiência da combustão, serão objeto de avaliação comparativa ao longo deste estudo, especialmente frente à proposta alternativa de propulsão híbrida.

As características físico-químicas destes combustíveis afetam diretamente os índices de consumo e emissões atmosféricas. Os valores considerados neste estudo são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Características físicas – químicas destes combustíveis

<b>Parâmetro</b>	<b>HFO</b>	<b>MGO</b>
<b>Poder calorífico inferior (PCI)</b>	40.200 kJ/kg	42.700 kJ/kg
<b>Densidade a 15 °C</b>	980 kg/m <sup>3</sup>	860 kg/m <sup>3</sup>
<b>Teor de enxofre (S)</b>	até 3,5%	até 0,5%
<b>Fator de emissão de CO<sub>2</sub></b>	3,114 kg CO <sub>2</sub> /kg	3,206 kg CO <sub>2</sub> /kg

Fonte: Adaptado IMO (2020); IPCC (2006).

#### **4.5.6 Eficiência energética e consumo específico**

Para a modelagem e análise energética da configuração atual da embarcação, foram adotados parâmetros técnicos de desempenho baseados nos dados fornecidos pelo fabricante dos motores principais, Wärtsilä, modelo 8L20, bem como informações consolidadas da literatura técnica.

O consumo específico de combustível (SFOC do inglês Specific Fuel Oil Consumption) dos motores principais é de 194 g/kWh, conforme dados do fabricante Wärtsilä. Esse valor corresponde a um regime típico de operação contínua em 75 % da potência nominal.

Além disso, a eficiência térmica média estimada dos motores é de aproximadamente 30%, podendo variar de acordo com o regime de carga e as condições operacionais de instalação. Essa eficiência representa a fração da energia contida no combustível que é efetivamente convertida em trabalho mecânico útil, sendo o restante dissipado sob forma de calor e perdas termodinâmicas.

Com base nesses parâmetros técnicos (SFOC), eficiência térmica e fator de carga será possível estimar, de forma precisa, o consumo energético total da embarcação, tanto em termos horários quanto em cenários operacionais estendidos. Essas estimativas serão aplicadas na comparação entre a configuração atual e a alternativa híbrida proposta, permitindo avaliar os ganhos em eficiência e a redução potencial no consumo de combustível e emissões.

#### 4.5.7 Fatores de emissão de gases

Para a quantificação das emissões atmosféricas provenientes da operação da embarcação, foram adotados os fatores médios de emissão recomendados por organismos internacionais, notadamente pela Organização Marítima Internacional (IMO, 2020) e pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006). Esses fatores permitem estimar a emissão de poluentes com base no tipo de combustível utilizado e no perfil de operação dos motores.

A Tabela 13 apresenta os fatores médios de emissão adotados para os dois tipos de combustíveis empregados na embarcação: MGO utilizado nos grupos geradores e azimutais, e o HFO exclusivo dos motores principais de propulsão.

Tabela 13 – Fatores de emissão média por tipo de combustível

<b>Poluente</b>	<b>Fator de Emissão – MGO</b>	<b>Fator de Emissão – HFO</b>
<b>Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	3,206 kg por kg de combustível	3,114 kg por kg de combustível
<b>Óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>)</b>	13,5 g/kWh	14,4 g/kWh
<b>Óxidos de Enxofre (SO<sub>x</sub>)</b>	variável: S × 20 g/kg	variável: S × 20 g/kg
<b>Material Particulado (PM)</b>	0,4 g/kWh	0,9 g/kWh

Fonte: Adaptado IMO (2020); IPCC (2006).

Embora o óleo combustível pesado seja comumente associado a maiores impactos ambientais, o seu fator de emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), quando expresso por unidade de massa de combustível, é ligeiramente inferior ao do óleo diesel marítimo. Essa diferença decorre da composição elementar dos combustíveis, uma vez que o MGO, por ser um combustível destilado, apresenta maior fração mássica de carbono por quilograma, resultando em maior conversão de carbono em CO<sub>2</sub> durante o processo de combustão, quando normalizado pela massa de combustível consumida.

O fator de emissão para SO<sub>x</sub> (óxidos de enxofre) é diretamente proporcional ao teor de enxofre presente no combustível utilizado. A estimativa desse poluente é realizada conforme apresentado na Equação (2).

$$E_{SO_x} = m_{\text{combustível}} * S * 20 \quad (2)$$

Onde:

- $E_{SO_x}$  = emissão total de óxidos de enxofre (kg  $SO_x$ /ano);
- $m_{combustível}$  = consumo anual de combustível (g  $NO_x$ /kWh);
- $S$  = fator de emissão de óxidos de enxofre (adimensional);
- 20 = fator referente à conversão da massa de enxofre para a massa equivalente de  $SO_x$ , conforme diretriz da IMO (IMO, 2020).

Esses parâmetros serão utilizados no modelo comparativo entre a configuração atual e a proposta híbrida, a fim de quantificar a potencial redução nas emissões de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos.

#### **4.5.8 Parâmetros para configuração híbrida (estimativa)**

Para a modelagem e análise comparativa da configuração híbrida da embarcação empurradora, foram estabelecidos parâmetros técnicos preliminares, fundamentados em referências da literatura e em especificações técnicas de sistemas híbridos navais, de modo a representar a inserção de motores elétricos como suporte à propulsão convencional. A potência nominal do motor elétrico de suporte foi estimada em 500 kW por linha de eixo, considerando a instalação de motores acoplados diretamente à linha de eixo, complementando a propulsão mecânica existente.

O fator de operação do motor elétrico foi definido de maneira conservadora, sendo previsto um uso de até 15 % do tempo total de operação da embarcação no cenário híbrido auxiliar e até 30 % no cenário híbrido ampliado, que considera o uso de MGO como combustível. Essa definição busca otimizar o consumo de combustível fóssil e reduzir as emissões atmosféricas durante fases operacionais que permitam maior aproveitamento da propulsão elétrica.

A eficiência global do sistema elétrico, englobando as perdas em inversores, motores elétricos e sistemas de transmissão, conforme dados técnicos de fabricantes e estudos de referência sobre sistemas híbridos embarcados. O suprimento energético é proveniente dos geradores diesel já existentes a bordo, com possibilidade de futura integração de bancos de baterias de íon-lítio, configurando um cenário hipotético de operação híbrida mais avançada e sustentável.

Os valores de tempo de operação em modo elétrico foram adotados de forma conservadora, visando evitar a superestimação dos ganhos energéticos e ambientais,

garantindo aderência às condições reais de operação de empurradores fluviais no Brasil. Esses parâmetros serão utilizados na simulação energética da embarcação, permitindo estimar o consumo total de energia elétrica e quantificar o potencial de redução percentual nas emissões de gases poluentes e de efeito estufa, especialmente CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> e PM, em comparação com a configuração convencional.

Além disso, serão considerados os dados construtivos da embarcação, como dimensões, deslocamento, características dos tanques e sistemas de propulsão, bem como os parâmetros de desempenho dos motores existentes, incluindo consumo específico, eficiência e emissões. Fatores de emissão serão adotados conforme as diretrizes da Organização Marítima Internacional (IMO, 2020) e da Convenção Europeia para a Proteção do Meio Ambiente Atmosférico (EMEP/EEA, 2019), garantindo precisão nas estimativas e relevância para o estudo.

#### **4.6 Ferramentas e referenciais normativos**

No desenvolvimento deste estudo, as ferramentas utilizadas desempenharam papel fundamental na organização, processamento e análise dos dados. O Microsoft Excel foi a principal plataforma computacional empregada, devido à sua ampla aplicabilidade em cálculos de engenharia, tratamento de dados e construção de planilhas dinâmicas. Sua flexibilidade permitiu estruturar tabelas de dimensionamento do sistema de propulsão híbrido, aplicar fórmulas de estimativa de potência e consumo energético, além de realizar simulações simplificadas de diferentes cenários operacionais. Gráficos comparativos foram elaborados para facilitar a visualização das diferenças de desempenho entre o arranjo convencional e o híbrido, possibilitando uma análise clara do impacto do sistema elétrico de suporte.

Considerando que o estudo não incluiu ensaios práticos a bordo, foram adotadas metodologias de cálculo consolidadas em normas internacionais. Nesse contexto, os fatores de emissão definidos pela IMO (MARPOL – Anexo VI) e pelo IPCC (2006 *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*) foram empregados para estimar as emissões de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> e MP a partir do consumo estimado de combustível. Essa abordagem garante alinhamento com relatórios internacionais de sustentabilidade e com os mecanismos de inventário de emissões adotados por diversos países e companhias marítimas.

Entre os referenciais normativos específicos do setor naval e energético utilizados, destacam-se o IMO MARPOL 73/78 – Anexo VI, que estabelece limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos e orienta o dimensionamento de sistemas híbridos compatíveis com a legislação ambiental; as diretrizes da Organização Marítima Internacional, incluindo os índices EEDI, SEEMP e EEOI, que fornecem indicadores de eficiência energética de embarcações e serviram como base metodológica para a análise de viabilidade; e as diretrizes do IPCC (2006), referência consolidada para cálculo de emissões de gases de efeito estufa.

O uso articulado de ferramentas computacionais, dados técnicos, relatórios institucionais e normas internacionalmente reconhecidas conferiu consistência metodológica, rastreabilidade dos resultados e compatibilidade com padrões técnicos exigidos por sociedades classificadoras e pela Organização Marítima Internacional, permitindo que as estimativas de desempenho e emissões do sistema híbrido sejam confiáveis dentro do escopo do estudo.

#### **4.7 Limitações do estudo**

E Apesar do rigor metodológico adotado, algumas limitações inerentes à pesquisa devem ser destacadas para contextualizar os resultados obtidos. Primeiramente, as simulações de desempenho foram realizadas com base em dados de literatura técnica, manuais de fabricantes e parâmetros de embarcações de referência. Dessa forma, não foram utilizados dados experimentais em tempo real de operação de empurradores híbridos, uma vez que tais informações são restritas ou ainda pouco disponíveis no contexto brasileiro.

Outra limitação está relacionada ao escopo computacional adotado. Embora o Microsoft Excel seja adequado para cálculos de dimensionamento e análises comparativas, não permite modelagem avançada de hidrodinâmica, dinâmica de fluidos ou simulação integrada de ciclos energéticos. Os resultados obtidos representam, portanto, estimativas simplificadas, passíveis de refinamento em estudos futuros utilizando softwares especializados, como ANSYS Fluent ou Matlab/Simulink.

Além disso, não foi contemplada uma análise econômica detalhada do projeto, incluindo custos de aquisição, instalação, operação e manutenção dos sistemas híbridos, nem o cálculo aprofundado do retorno sobre investimento (ROI). Essa lacuna limita a aplicação imediata dos resultados para decisões de caráter financeiro.

O estudo também não incluiu tecnologias emergentes além dos motores elétricos convencionais acoplados a linhas de eixo e baterias de íons de lítio. Soluções como baterias de estado sólido, células de combustível a hidrogênio ou algoritmos de controle baseados em inteligência artificial poderiam ampliar a eficiência e sustentabilidade do sistema, mas não foram incorporadas devido ao escopo temporal e técnico do trabalho.

Por fim, os resultados consideram um cenário médio de operação de empurradores fluviais, sem levar em conta a variabilidade sazonal e hidrológica dos rios brasileiros, que pode afetar consumo de combustível, eficiência energética e emissões. Dessa forma, os resultados devem ser entendidos como estimativas iniciais, fornecendo subsídios técnicos e científicos para estudos futuros. Recomenda-se que pesquisas posteriores incluam ensaios práticos, softwares de simulação avançados e análises econômicas detalhadas, consolidando a aplicabilidade industrial do sistema de propulsão híbrido proposto no contexto da navegação fluvial brasileira.

## 5 RESULTADOS

Este capítulo compõe o corpo técnico do trabalho. É onde o problema é analisado e a solução proposta é descrita. Sugere-se que ele seja dividido da seguinte forma:

### 5.1 Avaliação energética da configuração atual

A avaliação energética da configuração atual da embarcação tem como objetivo quantificar o desempenho dos motores principais e estimar tanto o consumo anual de combustível quanto as emissões atmosféricas associadas ao uso de óleo combustível pesado (HFO do inglês Heavy Fuel Oil). Essa análise permite compreender o comportamento energético do empurrador em sua condição original, servindo como base comparativa para a proposta futura de sistema híbrido.

A embarcação analisada está equipada com três motores principais, cada um com potência nominal de 1.600 kW, totalizando uma potência instalada de 4.800 kW. O regime operacional típico situa-se entre 70% e 90% da carga nominal, garantindo um equilíbrio entre desempenho, durabilidade dos componentes e consumo energético. O funcionamento contínuo dessa configuração representa uma parcela significativa dos custos operacionais anuais do armador, além de contribuir para a emissão de poluentes atmosféricos.

O cálculo do consumo de combustível foi realizado com base na Equação 3, onde  $P$  é a potência (kW),  $t$  o tempo de operação (h) e  $SFOC$  o consumo específico de combustível (g/kWh):

$$FC = P * t * SFOC \quad (3)$$

Com base no consumo específico de combustível (SFOC) de 194 g/kWh (Anexo A) valor obtido a partir de referências técnicas para motores marítimos movidos a HFO, foi estimado um consumo horário total de aproximadamente 931 kg/h. Esse valor reflete a elevada demanda energética característica de sistemas de propulsão convencionais.

Considerando o perfil de operação anual do empurrador, foram estabelecidos dois cenários representativos:

Operação Parcial: 12 horas diárias durante 335 dias por ano, resultando em um consumo anual estimado de aproximadamente 3.743 toneladas de HFO;

Operação Contínua: 24 horas diárias durante 365 dias por ano, resultando em um consumo anual de aproximadamente 8.157 toneladas de HFO.

Para o cálculo das emissões atmosféricas, foram utilizadas diferentes equações conforme o tipo de poluente. A Equação 1 foi aplicada para determinar a massa de CO<sub>2</sub> emitida, enquanto a Equação 2 foi utilizada para o cálculo do fator de emissão de SO<sub>x</sub>. Além disso, as emissões de material particulado (PM) e de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) foram determinadas por meio das Equações 4 e 5, respectivamente, conforme apresentado a seguir.

$$E_{PM} = P_{gerada} * FE_{PM} \quad (4)$$

Onde:

- E<sub>PM</sub> = emissão total de matéria particulada (Kg PM/ano);
- FC = potência gerada (kWh/ano);
- FE<sub>PM</sub> = fator de emissão de matéria particulada (g PM/kWh).

$$E_{NOx} = P_{gerada} * FE_{NOx} \quad (5)$$

Onde:

- E<sub>NO<sub>x</sub></sub> = emissão total de matéria particulada (kg NO<sub>x</sub>/ano);
- P<sub>gerada</sub> = potência gerada (kWh/ano);
- FE<sub>NO<sub>x</sub></sub> = fator de emissão de óxidos de nitrogênio (g NO<sub>x</sub>/kWh).

Com base no fator de emissão de 3,114 kg de CO<sub>2</sub> por kg de combustível, a emissão anual de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) situa-se entre 11.657 toneladas e 25.401 toneladas, dependendo do regime operacional. Além do CO<sub>2</sub>, foram estimadas as emissões específicas de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub> = 14,4 g/kWh), enxofre (S= 3,5%) e material particulado (MP = 0,9 g/kWh). Na Tabela 14 é possível observar os valores estimados para os gases poluente, de acordo com os dois cenários de operação.

Tabela 14 – Gases poluentes do HFO

<b>CO<sub>2</sub> = 3,144 Kg CO<sub>2</sub>/Kg</b>							
Cenário 01				Cenário 02			
CO <sub>2</sub> hora	2899,76	KG CO <sub>2</sub> /h		CO <sub>2</sub> hora	2899,76	KG CO <sub>2</sub> /h	
CO <sub>2</sub> dia	34797,082	KG CO <sub>2</sub> /dia		CO <sub>2</sub> dia	69594,16	KG CO <sub>2</sub> /dia	
CO <sub>2</sub> ano	11657022,34	KG CO <sub>2</sub> /ano		CO <sub>2</sub> ano	25401869,57	KG CO <sub>2</sub> /ano	
<b>SOX P/ S=3,5%</b>							
Cenário 01				Cenário 02			
SOX hora	651,84	KG SOX/h		SOX hora	651,84	KG SOX/h	
SOX dia	7822,08	KG SOX/dia		SOX dia	15644,16	KG SOX/dia	
SOX ano	2620396,8	KG SOX/ano		SOX ano	5710118,40	KG SOX/ano	
<b>NO<sub>x</sub> = 14,4 g/kWh</b>							
Cenário 01				Cenário 02			
NO <sub>x</sub> hora	69120,00	69,12	KG SOX/h	NO <sub>x</sub> hora	69120,00	69,12	KG SOX/h
NO <sub>x</sub> dia	829440,00	829,44	KG SOX/dia	NO <sub>x</sub> dia	1658880,00	1658,88	KG SOX/dia
NO <sub>x</sub> ano	277862400,00	277862,4	KG SOX/ano	NO <sub>x</sub> ano	605491200,00	605491,2	KG SOX/ano
<b>PM = 0,9 g/kWh</b>							
Cenário 01				Cenário 02			
PM hora	4320	4,32	KG PM/h	PM hora	4320	4,32	KG PM/h
PM dia	51840	51,84	KG PM/dia	PM dia	103680	103,68	KG PM/dia
PM ano	17366400	17366,4	KG PM/ano	PM ano	37843200	37843,2	KG PM/ano

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os resultados evidenciam que o sistema de propulsão baseado exclusivamente em motores a HFO apresenta elevado consumo energético e intensidade de emissões. Embora os motores ofereçam robustez e confiabilidade, a eficiência térmica limitada e o alto teor de enxofre do combustível contribuem significativamente para o impacto ambiental. Essa configuração, típica da geração anterior de empurradores fluviais, reflete um modelo de operação ainda dependente de combustíveis fósseis e sujeito às restrições ambientais impostas pela IMO.

## 5.2 Proposta de sistema híbrido com motor elétrico na linha de eixo

A proposta consiste em adotar uma arquitetura de propulsão híbrida paralela, na qual motores elétricos são acoplados mecanicamente às linhas de eixo já existentes do empurrador fluvial, compartilhando o mesmo eixo de propulsão com os motores diesel.

Nessa configuração, tanto o motor de combustão interna, alimentado a HFO, quanto o motor elétrico podem fornecer torque à hélice de forma individual ou combinada, dependendo da condição operacional. A integração é realizada por meio de um conjunto PTI/PTO (*Power Take-In/Power Take-Off*), instalado entre a caixa de redução e o eixo propulsor, permitindo que o motor elétrico funcione como acionador

em modo de propulsão (PTI) ou como gerador de energia (PTO), quando o motor estiver em operação.

Essa concepção híbrida busca unir a confiabilidade da propulsão mecânica convencional com a flexibilidade e a eficiência do sistema elétrico, resultando em um conjunto mais eficiente, sustentável e modular para a operação fluvial.

Considerando que cada motor elétrico possui potência de 500 kW por eixo, e adotando eficiência elétrica de 90% e fator de reserva de 20% (margem de segurança), utiliza-se a Equação (6) para o cálculo da potência elétrica de entrada.

$$P = \frac{M_s \times P_m}{N_e} \quad (6)$$

Onde:

- P = potência elétrica de entrada (kW);
- $M_s$  = margem de segurança (%);
- $P_m$  = potência do motor elétrico (kW);
- $N_e$  = eficiência elétrica (%).

Assim, cada motor elétrico deverá receber aproximadamente 555,5 kW, resultando em uma potência total requerida de 1.666,6 kW para as três linhas de eixo. Para fins de dimensionamento, esse valor foi arredondado para 2.000 kW de potência elétrica instalada, de modo a incorporar uma margem de segurança operacional, acomodar variações de carga, perdas no sistema elétrico e a padronização com potências comerciais disponíveis. Esse valor é utilizado como referência para o dimensionamento do sistema de geração e do banco de baterias.

Para a nova configuração, será necessária a implementação de novas formas de geração de energia: seja com a adição de novos geradores, a integração de baterias ou o rearranjo dos geradores existentes. Ressalta-se que o empurrador possui atualmente 2 geradores principais de 340 eKW e 1 gerador de emergência de 90 eKW.

Na Tabela 15, observam-se os possíveis cenários para suprir a demanda de potência, incluindo: adição de novos geradores; substituição dos dois geradores principais por outros de maior potência; instalação de bancos de baterias como fonte alternativa de energia, dimensionados para 1 hora de operação, considerando margem de perda de até 30%.

Tabela 15 – Cenários para suprir demanda motor elétrico

Cenário	Geradores adicionados		Potência geradores existentes (kW)	Bateria potência		Bateria instalada (kWh)	Bateria instalada (A)
	Quantidade	Potência (kW)		Tempo (h)	Potência (kW)		
1	1	2000	680	N/A	N/A	N/A	N/A
2	2	1000	680	N/A	N/A	N/A	N/A
3	2	1340	0	N/A	N/A	N/A	N/A
4	1	1500	680	N/A	N/A	N/A	N/A
5	1	1500	680	1	500	650	54166
6	2	1200	0	1	280	364	30333
7	2	1000	680	1	536	697	58083

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Cada motor elétrico será controlado por um inversor, interligado a um sistema de gerenciamento de energia responsável por distribuir a potência entre os motores, os geradores e o banco de baterias.

De qualquer forma, a adoção do sistema híbrido de propulsão, com motor elétrico integrado à linha de eixo, surge como uma alternativa que não é apenas tecnicamente viável, mas também sustentável incentivando uma eficiência operacional superior, reduzindo o consumo de combustível e os impactos ambientais da navegação fluvial. Além de estar em conformidade com as normas internacionais, esse conjunto proporciona maior facilidade nas operações, tornando-se uma solução inovadora e estratégica para o futuro do transporte hidroviário interior.

### 5.3 Dimensionamento do sistema híbrido

O novo arranjo de propulsão tem como objetivo, substituir a propulsão convencional, atualmente composta por motores de combustão interna alimentados por óleo combustível pesado, que é altamente prejudicial ao meio ambiente, por um sistema de propulsão híbrido diesel-elétrico. Essa configuração visa manter a mesma potência de propulsão instalada.

O empurrador fluvial possui atualmente três motores principais, cada um com potência nominal de 1.600 kW, totalizando 4.800 kW de potência de propulsão. O sistema híbrido deverá preservar essa potência total, permitindo que o motor elétrico possa substituir parcial ou totalmente o motor térmico durante a operação.

Utilizando a Equação 6, para calcular a potência elétrica, chega aos seguintes dados 1.777,77 kW em cada motor. Como são três motores, o valor total é de 5.333,33 kW, o conjunto elétrico será dimensionada em cima desse valor.

O sistema elétrico será supervisionado por um EMS, que é componente de suma importância para o sistema de hibridização, pois é ele que irá ditar os modos de opção da embarcação. Sistema será o responsável por ditar em qual modo vai estar operando, ele precisa ter uma alta eficiência pois quanto maior ela for menos poluente para meio ambiente a propulsão será, responsáveis pela coordenação dos geradores, baterias e cargas de propulsão.

O painel de controle central deve permitir a seleção automática dos modos de operação: modo diesel - propulsão convencional; modo elétrico - propulsão elétrica pura; modo híbrido - operação combinada. A automação do sistema é realizada pelo Sistema de Gestão de Energia, responsável por gerenciar automaticamente a utilização da energia proveniente das baterias e dos grupos geradores, com base na demanda de potência, no estado de carga das baterias e nas condições operacionais da embarcação.

A fonte de abastecimento de energia elétrica do sistema de propulsão híbrida será fornecida por geradores e baterias de íons de lítio. A escolha desse tipo de bateria se deve à sua maior eficiência em comparação com outras tecnologias. Os geradores e baterias serão utilizados para alimentar os motores, considerando uma margem de segurança de 20%. Assim, a potência elétrica total necessária é de aproximadamente 6.400 kW para os três motores.

Com o objetivo de otimizar o espaço e garantir viabilidade operacional, serão utilizados três geradores, um para cada motor. Essa configuração facilita a logística e melhora a eficiência energética. Caso apenas os geradores fossem utilizados para alimentar os motores, cada unidade precisaria fornecer cerca de 2.140 kW.

Para fazer o dimensionamento das baterias será necessário converter de quilowatt (kW) para ampères (A). Abaixo na Tabela 16 com os cenários para os geradores e baterias, é possível observar dois cenários, onde se utiliza baterias e geradores, e um outro que só usa geradores.

Tabela 16 – Cenários para suprir demanda motor híbrido

Cenário	Geradores		Bateria potência		Bateria instalada (kW)	Bateria instalada (A)
	Quantidade	Potência (kW)	Tempo	Potência (kW)		
1	3	2140	N/A	N/A	N/A	N/A
2	3	2140	24	1800	43200	150.000

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

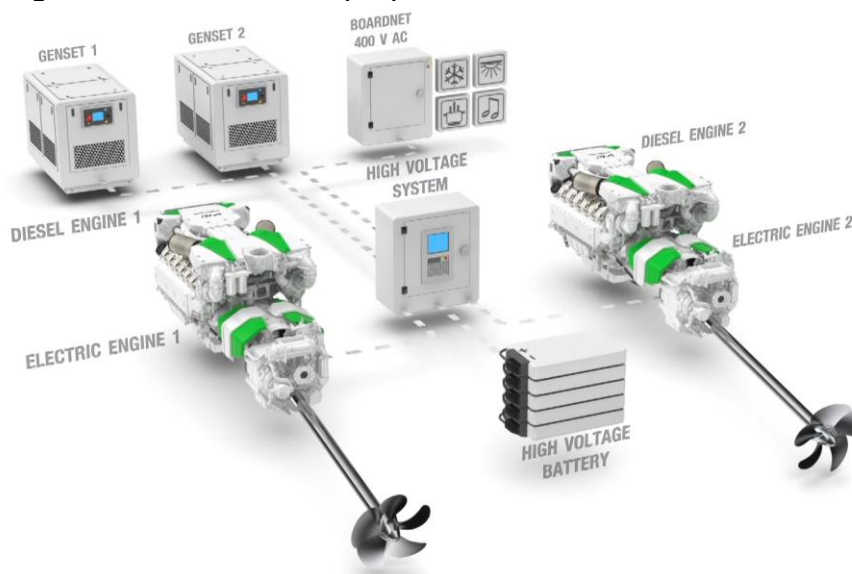
As baterias de íons de lítio foram selecionadas por apresentarem alta densidade energética, longa vida útil e elevado rendimento quando comparadas a outras tecnologias, como chumbo-ácido ou níquel-cádmio. Além disso, oferecem baixo nível de manutenção e estabilidade térmica aprimorada, características indispensáveis em aplicações navais sujeitas a vibrações e variações de temperatura.

Atualmente, duas empresas se destacam no fornecimento de soluções completas de propulsão híbrida diesel-elétrica: MAN Energy Solutions e e-Motion.

A e-Motion oferece sistemas destinados a embarcações de pequeno e médio porte, como iates e embarcações de apoio, podendo exigir adaptação de potência para aplicações em empurradores. Já a MAN Energy Solutions fornece soluções modulares para embarcações de diversos portes, incluindo motores, geradores, sistemas de controle e integração elétrica.

A Figura 26 apresenta um diagrama típico de um sistema híbrido fornecido pela MAN, composto por geradores, motores elétricos, bancos de baterias, inversores e painéis de controle. O EMS, embora não representado graficamente, é o elemento central responsável pela automação, monitoramento e otimização dos fluxos de energia entre os componentes, garantindo a operação nos modos Diesel, Elétrico ou Híbrido Combinado conforme a demanda operacional.

Figura 26 – Sistema de propulsão híbrida



Fonte: MAN.

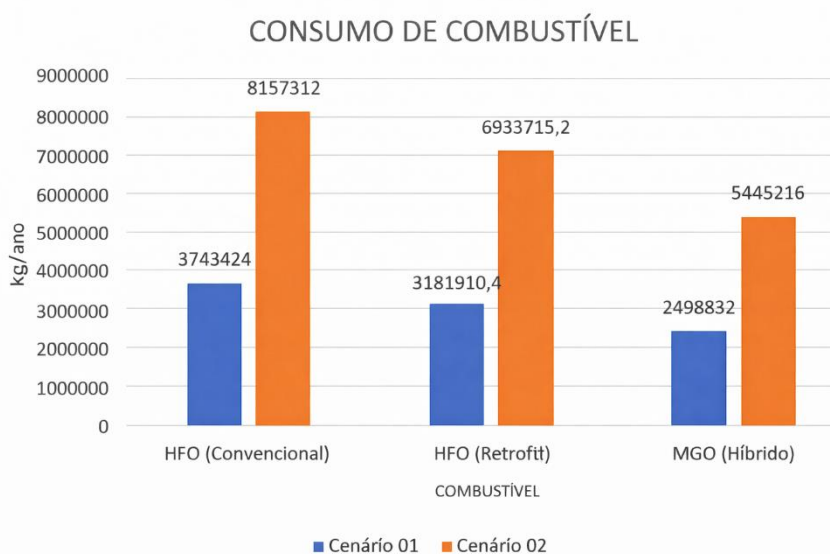
Em síntese, o dimensionamento do sistema híbrido proposto assegura viabilidade técnica e eficiência operacional, permitindo significativa redução do consumo de combustível e das emissões de poluentes, além de possibilitar futuras expansões do sistema, como a integração de fontes renováveis de energia e a ampliação da autonomia elétrica.

#### **5.4 Comparativo de desempenho: convencional x híbrido**

Agora será feita a análise comparativa entre as configurações de propulsão propostas no decorrer deste trabalho. Entre os sistemas de propulsão convencional (movido a HFO), *retrofit* (adição de um motor elétrico à linha de eixo) e híbrido, o objetivo foi avaliar o comportamento energético e ambiental do empurrador, considerando o perfil operacional típico de embarcações fluviais de médio porte. O estudo baseou-se nas estimativas de consumo de combustível e nas emissões anuais de gases poluentes (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> e PM), de acordo com os regimes de operação simulados para cada cenário. Todas as análises foram realizadas considerando o cenário de atividade com maior tempo de operação: operação contínua (24 h/dia, 365 dias/ano).

No modo convencional, operando com óleo combustível pesado (HFO do inglês *Heavy Fuel Oil*), o consumo anual estimado foi de 8.157.312 kg/ano. Com a adoção de motor elétrico, ainda utilizando HFO, mas com otimização dos motores e controle eletrônico, o consumo caiu para 6.933.715,20 kg/ano. Já no modo híbrido, com o uso de óleo diesel marítimo (*MGO do inglês Marine Gas Oil*) e um sistema elétrico, o consumo reduziu-se para 5.445.216 kg/ano, esses resultados podem ser observados melhor no Gráfico 1. Essa diferença representa uma redução global de aproximadamente 33,2% no consumo de combustível em relação ao sistema convencional, evidenciando o ganho na eficiência energética do arranjo híbrido.

Gráfico 1 – Comparativo de consumo de combustível

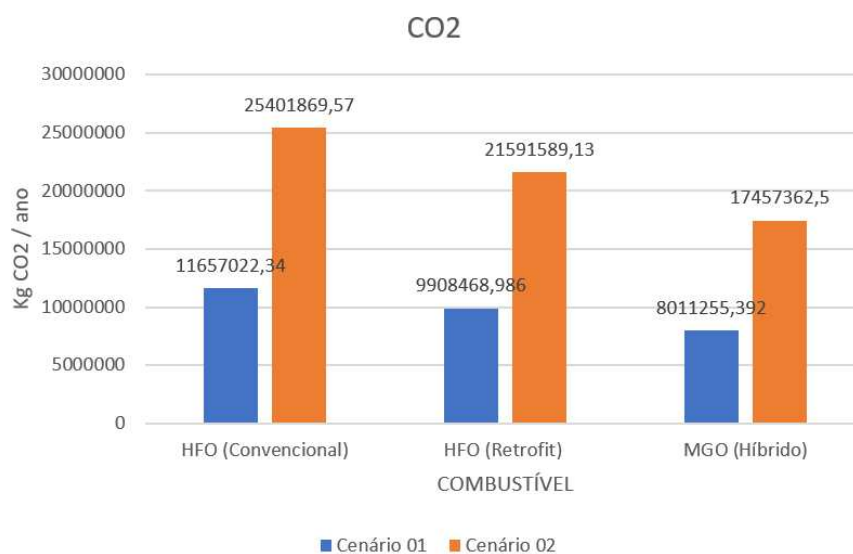


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O consumo energético estimado no sistema híbrido é resultado da operação combinada entre motores a combustão e propulsão elétrica, com alternância de modos conforme a demanda de potência. Durante períodos de manobra, baixa velocidade ou espera, a propulsão elétrica supre no *retrofit* em torno de 15% e no sistema híbrido completo em torno de 30% (uma estimativa de valores) da energia total, reduzindo o funcionamento dos motores principais e, conseqüentemente, o consumo específico de combustível.

O Gráfico 2 apresenta o comparativo das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para cada modo de operação. O sistema convencional emitiu 25.401.869,57 kg/ano, enquanto o *retrofit* apresentou 21.591.589,13 kg/ano e o sistema híbrido 17.457.362,50 kg/ano, o que representa uma redução total de 31,3% em relação ao cenário base. Essa diminuição está diretamente associada ao menor consumo de combustível e ao uso de MGO, que possui melhor desempenho de combustão e menor teor de carbono.

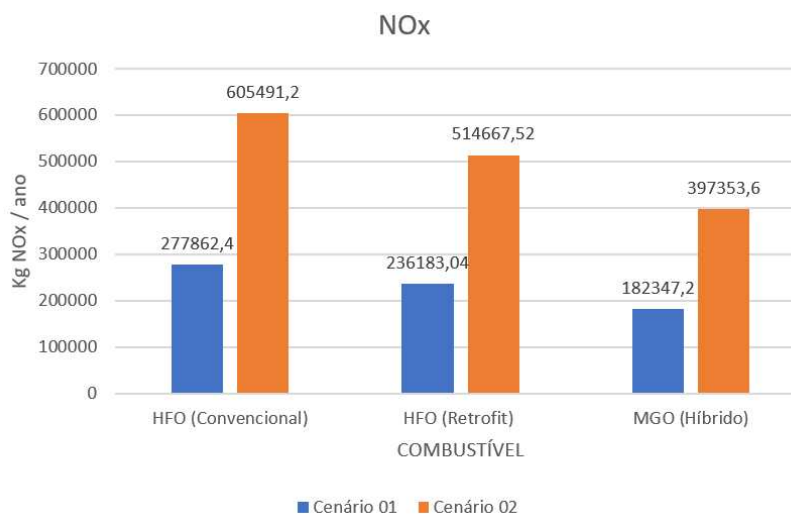
Gráfico 2 – Comparativo das emissões de CO<sub>2</sub> nos diferentes modos de operação



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Quanto às emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), observou-se comportamento semelhante, conforme apresentado no Gráfico 3. O sistema convencional apresentou 605.491,20 kg/ano, enquanto o *retrofit* reduziu para 514.667,52 kg/ano, e o híbrido para 397.353,60 kg/ano, equivalendo a uma diminuição de 34,4%% em relação à operação exclusivamente HFO.

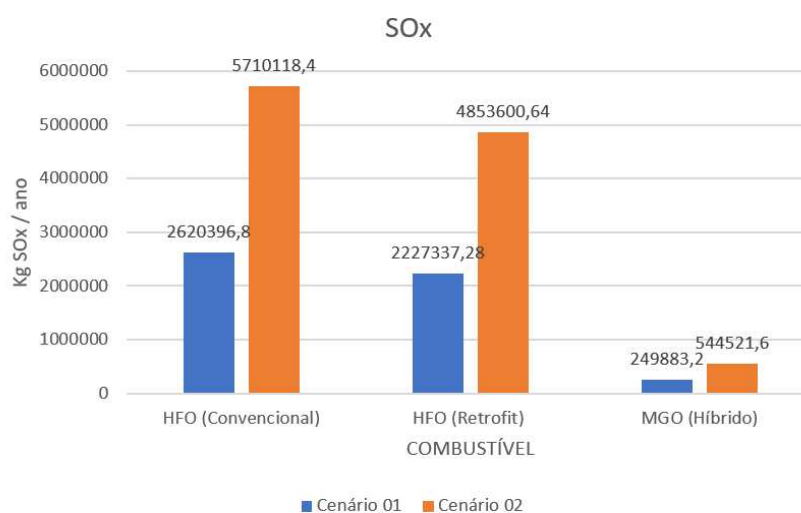
Gráfico 3 – Comparativo das emissões de NO<sub>x</sub> nos diferentes modos de operação



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os resultados para óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) mostraram a maior diferença percentual entre os cenários analisados, conforme ilustrado no Gráfico 4. O sistema convencional emitiu 5.710.118,40 kg/ano, valor que caiu para 4.853.600,64 kg/ano no retrofit e apenas 544.521,60 kg/ano no modo híbrido, uma redução superior a 90,5%. Esse decréscimo expressivo decorre do uso do MGO, combustível com baixo teor de enxofre (0,1%), em substituição ao HFO, cujo teor pode atingir até 3,5%. Devido a essa diferença, o HFO gera naturalmente maiores quantidades de óxidos e partículas durante a combustão.

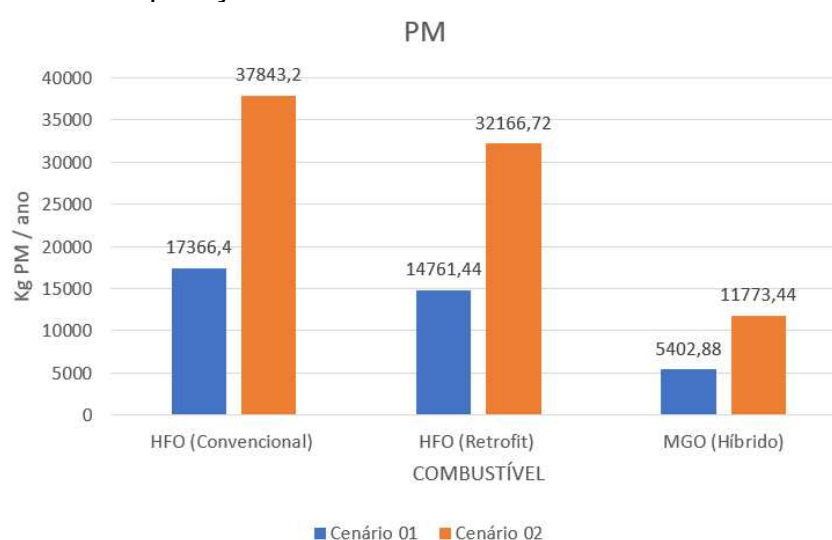
Gráfico 4 – Comparativo das emissões de SO<sub>x</sub> nos diferentes modos de operação



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Por fim, o Gráfico 5 apresenta as emissões de material particulado (PM), que diminuíram de 37.843,2 kg/ano no sistema convencional para 32.166,72 kg/ano no retrofit e 11.773,44 kg/ano no sistema híbrido. A redução total foi de aproximadamente 68,9%, valor consistente com a melhoria da qualidade da combustão e a utilização de combustível de menor teor de impurezas. Os dados detalhados dos cálculos realizados para as comparações estão disponíveis nos apêndices deste trabalho.

Gráfico 5 – Comparativo das emissões de PM nos diferentes modos de operação



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Esses resultados comprovam a eficiência energética e ambiental do sistema híbrido, alinhando-se às metas de descarbonização da Organização Marítima Internacional (IMO) e às exigências de eficiência energética operacional. Além disso, a redução expressiva de  $\text{SO}_x$  e PM representa ganhos diretos para a qualidade do ar nas regiões portuárias e fluviais, contribuindo para a mitigação dos impactos locais da navegação interior.

Sob o ponto de vista econômico, a redução do consumo de combustível implica uma economia anual significativa, estimada em cerca de US\$ 641.700,00 por ano em custos de combustível, o que reforça o potencial de retorno associado à adoção da propulsão híbrida no perfil operacional analisado. Além disso, a menor operação dos motores a combustão contribui para reduzir a demanda total de combustível,

favorecendo a economia ao longo do tempo e ampliando a atratividade do sistema proposto.

Para quantificar essa estimativa, considerou-se o preço médio do MGO em torno de US\$ 810/t e do HFO em US\$ 474,50/t, bem como a diferença entre o consumo anual do sistema convencional (8.157,31 t/ano) e o do sistema híbrido (5.445,22 t/ano), resultando em uma redução aproximada de 2.712,09 t/ano. Embora o MGO apresente custo unitário superior, o ganho de eficiência energética e o menor consumo total tornam o sistema híbrido economicamente mais vantajoso no longo prazo, especialmente quando associado à redução do tempo de funcionamento dos motores a combustão.

## 5.5 Considerações sobre implementação

A implementação de sistemas de propulsão híbridos em embarcações fluviais existentes não pode ocorrer de forma direta, sendo necessária uma análise detalhada dos obstáculos técnicos e logísticos durante a fase de projeto e produção. O maior desafio técnico refere-se à integração elétrica e mecânica entre os sistemas convencionais já existentes, como motores principais, geradores e sistemas auxiliares, e os novos módulos de propulsão elétrica, incluindo inversores, bancos de baterias e drivers de energia.

Outro aspecto relevante é a questão do espaço disponível. Em embarcações de trabalho, essa limitação não se apresenta de forma crítica, mas ainda assim deve ser considerada, especialmente no que diz respeito à instalação de um sistema de resfriamento eficiente para as baterias, visto que serão diversas unidades acopladas, sendo necessária uma climatização adequada para garantir segurança e desempenho.

Em termos logísticos, a instalação dos novos componentes demanda planejamento minucioso, considerando limitações de espaço e a necessidade de paradas operacionais controladas. O *retrofit* pode exigir o reposicionamento de tanques, especialmente no caso de sistemas híbridos que utilizam óleo diesel marítimo (MGO do inglês *Marine Gas Oil*), pois os tanques de óleo combustível pesado (HFO do inglês *Heavy Fuel Oil*), precisarão ser rearranjados. Além disso, é necessários o redimensionamento e a adição de novos cabos, bem como a construção de reforços estruturais para acomodar os novos equipamentos. Após essas alterações, recomenda-

se realizar uma análise de estabilidade e uma avaliação hidrodinâmica, a fim de verificar os efeitos do novo arranjo sobre o equilíbrio do empurrador e seu desempenho operacional.

O investimento requerido constitui outro fator crítico. Sistemas híbridos possuem custo significativamente superior ao de sistemas convencionais. Embora não tenham sido obtidos valores precisos para um sistema híbrido completo, sabe-se que os custos serão elevados devido ao grande número de baterias e à necessidade de geradores mais robustos. A substituição do HFO pelo MGO implica aumento no custo do combustível, porém, como o diesel continuará sendo utilizado em conjunto com a propulsão elétrica, o impacto financeiro não se mostra expressivo.

Adicionalmente, a operação de um sistema híbrido exige que a tripulação possua conhecimento técnico específico, tanto sobre os modos de operação quanto sobre o gerenciamento de energia (EMS do inglês *Energy Management System*) e os procedimentos de emergência. O treinamento adequado é fundamental, pois, apesar do sistema ser automatizado, a falta de preparo da equipe pode resultar em perda de eficiência energética e comprometimento do desempenho operacional.

Dessa forma, a adoção de um sistema híbrido em empurradores fluviais, embora tecnicamente desafiadora, é plenamente viável quando planejada sob os princípios de engenharia integrada e em conformidade com as normas ambientais vigentes. A superação das barreiras técnicas e logísticas depende da aplicação de boas práticas de engenharia, do treinamento contínuo da tripulação e da observância rigorosa das diretrizes da Organização Marítima Internacional (IMO do inglês *International Maritime Organization*), da Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição Causada por Navios (MARPOL do inglês *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*) e das entidades classificadoras. Nesse contexto, a implementação representa não apenas um avanço tecnológico, mas também uma estratégia de sustentabilidade operacional e de adequação regulatória, alinhada às metas globais de descarbonização do transporte aquaviário.

Além dos ganhos energéticos e ambientais, a implementação da propulsão híbrida em empurradores fluviais é incentivada por fatores econômicos, regulatórios e operacionais. A redução do consumo de combustível e dos custos de manutenção em regimes de baixa carga tende a compensar o maior investimento inicial ao longo da vida útil da embarcação.

Do ponto de vista regulatório, as metas de descarbonização e as exigências ambientais impostas por normas nacionais e internacionais favorecem a adoção de sistemas híbridos, que apresentam menores emissões de gases poluentes. Adicionalmente, a maior flexibilidade operacional e a adequação às diferentes condições da navegação interior reforçam a viabilidade e o interesse na implementação dessa tecnologia na frota fluvial brasileira.

## 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo propor e avaliar uma configuração de sistema de propulsão híbrido aplicada a um empurrador fluvial, visando ao aumento da eficiência energética, à redução do consumo de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, à diminuição das emissões de gases poluentes na atmosfera. Ao longo do estudo, foram analisados os aspectos técnicos, operacionais e ambientais associados à hibridização de sistemas navais, evidenciando sua viabilidade técnica e sua relevância para a navegação interior no Brasil.

A temática escolhida mostrou-se de grande importância para o avanço tecnológico e sustentável do setor naval, especialmente diante das metas globais de descarbonização estabelecidas pela Organização Marítima Internacional (IMO do inglês *International Maritime Organization*) e pela Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição Causada por Navios (MARPOL do inglês *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*). Mais do que sua relevância científica, o tema serve à adoção de métodos de propulsão mais eficazes e sustentáveis, cientes de que, em um mundo em constante mudança, o setor naval deve se alinhar a novos critérios de sustentabilidade.

Os objetivos que foram traçados estão cumpridos, ainda que a análise tenha se limitado ao aspecto teórico. Os resultados obtidos indicam que a adoção da arquitetura híbrida tende a favorecer o desempenho em perfis operacionais caracterizados por variações de carga e períodos prolongados de operação, ao possibilitar a combinação ou alternância de modos de propulsão conforme a demanda de potência.

Como consequência, observa-se redução do consumo total de combustível no cenário híbrido quando comparado ao convencional, evidenciada pela diferença entre o consumo anual estimado da configuração convencional e o da configuração híbrida, resultando em uma redução. Essa redução contribui diretamente para a diminuição das emissões associadas ao consumo de combustível (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> e PM), reforçando o potencial ambiental da proposta.

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se o aperfeiçoamento de modelos de simulação hidrodinâmica, a análise de sistemas de propulsão que utilizem painéis fotovoltaicos integrados ao sistema híbrido e a realização de estudos

computacionais mais aprofundados sobre o comportamento energético da configuração proposta neste trabalho.

Em síntese, o presente estudo evidencia que a propulsão híbrida, ainda esteja em fase inicial de aplicação no setor naval e existam aspectos a serem aprimorados, constitui um caminho viável e sustentável para o futuro da navegação fluvial, representando um avanço significativo em direção a uma matriz energética mais limpa e eficiente, representa um avanço significativo rumo à sustentabilidade e à inovação tecnológica na engenharia mecânica e naval brasileira.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, T. O. N.; MENDONÇA, F. M. F. **A influência dos propulsores na capacidade de manobra dos rebocadores**. Marinha do Brasil – EFOMM, 2017.
- AKA GROUP. **Hybrid propulsion**. Disponível em: <https://www.aka-group.com/marine-power/aka-hybrid-propulsion/>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- AMERICAN BUREAU OF SHIPPING (ABS). **Rules for building and classing steel vessels**. Houston: ABS, 2020.
- ANDRADE, R. B.; MARTINS, C. F. **Sistemas de propulsão naval e eficiência energética**. Rio de Janeiro: Interciência, 2021.
- ASLAN, J. F.; PINTO, A. E. M.; OLIVEIRA, M. M. de. **Poluição do meio ambiente marinho: um breve panorama dos princípios, instrumentos jurídicos e legislação brasileira**. Planeta Amazônia: Revista Internacional de Direito Ambiental e Políticas Públicas, Macapá, n. 9, p. 175-186, 2017.
- BABICZ, J. **Wärtsilä Encyclopedia of Ship Technology**. 2. ed. Helsinki: Wärtsilä, 2015.
- BARCOS EXPRESSOS. **Empurrador de 6400 HP #barco #navio #motor #rebocador #barcaça #grão #hidrovia**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=hvIjNgc5o2o>. Acesso em: 8 out. 2025.
- BRIGHT HUB ENGINEERING. **Electrical power distribution system for ships**. 2012. Disponível em: <https://www.brighthubengineering.com/marine-engines-machinery/72835-shipboard-electrical-distribution-system/>. Acesso em: 17 jun. 2025.
- CARVALHO, A. V. G. **Sistemas de combustíveis e suas compatibilidades para as embarcações mercantes**. Rio de Janeiro: CIAGA, 2014.
- CATERPILLAR. **Electric Power Applications Guide**. Illinois: Caterpillar Inc., 2022. Disponível em: <https://www.cat.com>. Acesso em: 17 jun. 2025.
- CATERPILLAR. **Electric Power Generation Product Line – C18 & C4.4 Spec Sheets**. Illinois: Caterpillar Inc., 2022. Disponível em: <https://www.cat.com>. Acesso em: 17 jun. 2025.
- CEBRI – CENTRO BRASILEIRO DE RELAÇÕES INTERNACIONAIS. **Alternativas de descarbonização para o setor de transporte marítimo no Brasil**. Rio de Janeiro, 2023.
- CETO. **ECA Guide**. [S. l.]: CETO, 2024. Disponível em: <https://static1.squarespace.com/static/6155b5bdada6ea1708c2c74d/t/662f1c2f7f6fd424b09a3851/1714363440367/ECA+Guide.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2025.

COUTINHO, M. **Funcionamento básico do motor diesel 4 tempos**. LinkedIn, 12 ago. 2016. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/funcionamento-b%C3%A1sico-do-motor-diesel-4-tempos-marcos-coutinho/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

DNV GL – DET NORSKE VERITAS. **Rules for classification: electrical systems**. Oslo: DNV GL, 2021.

FONSECA, M. M. **Arte Naval**. 6. ed. Rio de Janeiro: Serviço de Documentação da Marinha, 2002. v. 1.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GOULARTE, B. S.; ALVIM, A. M. **A comercialização de créditos de carbono e seu impacto econômico e social**. *Análise*, Porto Alegre, v. 22, n. 1, p. 72-88, jan./jun. 2011.

GUCMA, M. et al. **A critical analysis of the utilization of fossil fuels by the maritime sector concerning the decarbonization process**. *Transportation Research Procedia*, v. 83, p. 165-169, 2025.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 1988.

HIDROVIAS DO BRASIL. **Relatório Integrado**, 2023. Disponível em: <https://ri.hbsa.com.br>. Acesso em: 19 jun. 2025.

IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Shipboard Power Systems Design and Verification Fundamentals**. New York: IEEE/Wiley, 2018.

INAL, O. B.; CHARPENTIER, J.-F.; DENIZ, C. **Hybrid power and propulsion systems for ships: current status and future challenges**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 156, p. 111965, 2022. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111965.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). **International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL 73/78). Annex VI – Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships**. London: IMO, 2020.

ISO. ISO 15016:2015 – **Ships and marine technology – Guidelines for the assessment of speed and power performance by analysis of speed trial data**. Geneva: International Organization for Standardization, 2015.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

LOPES, F. B. **Rebocadores portuários e fluviais: projeto, operação e aplicações**. Rio de Janeiro: Expressão Naval, 2012.

MALOBERTI, L.; ZACCONE, R. **An environmentally sustainable energy management strategy for marine hybrid propulsion**. *Energy*, v. 316, p. 134517, 2 jan. 2025.

MAN ENERGY SOLUTIONS. **Marine Engine Programme**, 2024. Augsburg: MAN ES, 2024.

MAN. **A comparison of marine hybrid system operating modes**. Disponível em: <https://www.man.eu/engines/en/products/marine/hybrid-systems/operating-modes/hybrid-systems-operating-modes.html>. Acesso em: 4 out. 2025.

MARTY, P. **Ship energy efficiency study: development and application of an analysis method (Figura A.5)**. 2014. Disponível em: [https://www.researchgate.net/figure/Figure-A5-Diesel-generator-diagram\\_fig28\\_262821618](https://www.researchgate.net/figure/Figure-A5-Diesel-generator-diagram_fig28_262821618). Acesso em: 17 jun. 2025.

MEIRELLES, M. R. **Sistemas híbridos e a geração de energia elétrica a bordo de navios**. Rio de Janeiro: Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, Marinha do Brasil, 2013. Monografia (Curso de Formação de Oficiais da Marinha Mercante).

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Plano Hidroviário Estratégico – PHE**. Brasília: Ministério dos Transportes, 2012.

MRZLJAK, V.; MRAKOVČIĆ, T. **Comparison of COGES and Diesel-Electric Ship Propulsion Systems**. *Pomorski Zbornik*, v. 60, p. 131-148, 2016.

OFFSHORE ENERGY. **Stena RoRo: new LNG-electric ferry fitted with world's largest battery delivered**. *Offshore Energy*, 25 jun. 2024. Disponível em: <https://www.offshore-energy.biz/stena-roro-new-Ing-electric-ferry-fitted-with-worlds-largest-battery-delivered/>. Acesso em: 29 jun. 2025.

ORTO NÁUTICO. **Hélices, modelos e sua importância**. 10 abr. 2023. Disponível em: <https://www.portonautico.blog/post/h%C3%A9lices-modelos-e-sua-import%C3%A2ncia>. Acesso em: 21 jun. 2025.

PARK, Y.; KIM, H. **Advanced design of naval ship propulsion systems utilizing battery-diesel generator hybrid electric propulsion systems**. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 12, p. 2034, 2024. DOI: 10.3390/jmse12112034.

PEIXOTO, C. S. **Modelagem, simulação e controle de sistemas de propulsão híbridos para redução de emissões na indústria naval**. [S. l.: s.n.], 2022. Monografia (Graduação em Engenharia).

PEREIRA JUNIOR, S. **Introdução à Praça de Máquinas Navio PLSV**. Scribd, 2024. Disponível em: <https://pt.scribd.com/presentation/806221477/Introducao-a-Praca-de-Maquinas-Navio-PLSV>. Acesso em: 3 jan. 2026.

POMPERMAYER, F. M.; CAMPOS NETO, C. A. S.; PAULA, J. M. P. **Hidroviás no Brasil: perspectiva histórica, custos e institucionalidade**. Rio de Janeiro: IPEA, 2014. (Texto para Discussão, nº 1931).

PULKRABEK, W. W. **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine**. 2. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2003.

RADICA, G.; VIDOVIĆ, T.; ŠIMUNOVIĆ, J.; JURIĆ, Z. **Overview of hybrid marine energy system configurations and system component modeling approaches**. *Energies*, v. 18, p. 1189, 2025. DOI: 10.3390/en18051189.

REPOSITÓRIO MAR. **Transporte fluvial: empurradores e comboios**. Material acadêmico da Marinha do Brasil.

RESEARCHGATE. **Diesel generator diagram**. Disponível em: [https://www.researchgate.net/figure/Figure-A5-Diesel-generator-diagram\\_fig28\\_262821618](https://www.researchgate.net/figure/Figure-A5-Diesel-generator-diagram_fig28_262821618). Acesso em: 17 jun. 2025.

RODRIGUES, J. C. **Arquitetura Naval**. 1. ed. Rio de Janeiro: Diretoria de Portos e Costas, 2013.

ROSLAN, S. B.; KONOVESSIS, D.; TAY, Z. Y. **Hybrid ship propulsion systems**. *Encyclopedia*, 4 jan. 2023. Disponível em: <https://encyclopedia.pub/entry/39706>. Acesso em: 17 jun. 2025.

SCHILLER, R. A. **Análise da eficiência energética em navios mercantes e estudo de caso do consumo de combustível em navio aliviador do tipo Suezmax**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2016.

SEITHE, G. J. et al. **Maritime transport in a life cycle perspective: how fuels, vessel types, and operational profiles influence energy demand and greenhouse gas emissions**. *Energies*, v. 13, n. 11, p. 2739, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/11/2739>. Acesso em: 22 jun. 2025.

SINAVAL. **Aliança lança seu primeiro rebocador portuário, o Aliança Minuano**. 2017. Disponível em: <http://sinaval.org.br/2017/06/alianca-lanca-seu-primeiro-rebocador-portuario-o-alianca-minuano/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

SOUZA, F. A. C. de. **Avaliação da manobrabilidade de uma embarcação com base na substituição do seu sistema propulsivo convencional por um sistema propulsivo azimutal**. UFRJ/COPPE, 2023.

SOUZA, R. de A. **A comercialização de crédito de carbono e seu impacto econômico e social**. Dissertação (Mestrado em Direito) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SUSTAINABLE SHIPS. **Specific fuel consumption: the key to energy efficiency**. Disponível em: <https://www.sustainable-ships.org/stories/2022/sfc>. Acesso em: 21 jun. 2025.

STENA RORO. **Stena RoRo takes delivery of the battery hybrid vessel Guillaume de Normandie**. 25 dez. 2024. Disponível em: <https://stenaroro.com/news/stena-roro-takes-delivery-of-the-battery-hybrid-vessel-guillaume-de-normandie/>. Acesso em: 29 jun. 2025.

TUCCI, Carlos A. M. **Arquitetura naval**. Rio de Janeiro: LTC, 1999.

VIRTUE MARINE. **Different types of ship bunkers used in the maritime industry**. Disponível em: <https://www.virtuemarine.nl/post/different-types-of-ship-bunkers-used-in-the-maritime-industry>. Acesso em: 22 jun. 2025.

WÄRTSILÄ. **Marine Diesel Generating Sets Product Catalog. Vaasa: Wärtsilä Corporation**, 2023. Disponível em: <https://www.wartsila.com>. Acesso em: 17 jun. 2025.

WÄRTSILÄ. **New Wärtsilä 31 engine achieves Guinness World Records title**. 2 jun. 2015. Disponível em: <https://www.wartsila.com/media/news/02-06-2015-new-wartsila-31-engine-achieves-guinness-world-records-title>. Acesso em: 21 jun. 2025.

WÄRTSILÄ. **Wärtsilä 20 Product Guide. Vaasa: Wärtsilä Corporation**, 2023. Disponível em: <https://www.wartsila.com/marine/build/marine-engines/wartsila-20>. Acesso em: 6 jun. 2025.

WÄRTSILÄ. **Wärtsilä hybrid propulsion solution selected for three new cargo vessels**. 2023. Disponível em: <https://www.wartsila.com/media/news/12-12-2023-wartsila-hybrid-propulsion-solution-selected-for-three-new-cargo-vessels-3390788>. Acesso em: 29 jun. 2025.

WEI, H. K. **Comparative study of emissions of heavy fuel oil and liquified natural gas as maritime fuels by life cycle analysis**. Rio Oil & Gas Conference, 2020.

WIKIPEDIA. **Pusher (boat)**. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Pusher\\_\(boat\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Pusher_(boat)) Acesso em: 19 jun. 2025.

ZANELLA, T. V. **Navios e poluição do ar: um estudo sobre a regulação das emissões atmosféricas por embarcações**. Revista da Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, p. 301-328, maio/ago. 2018. DOI: 10.22491/1809-3191.v24n2.p301-328.

ZHANG, X. et al. **Hybrid electric propulsion systems for marine applications: a review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 81, p. 2230–2241, 2018.

## APÊNDICE A – PLANILHA DE CÁLCULO DOS GASES MODELO HFO CONVENCIONAL

OBTENHA O OFFICE ORIGINAL Sua licença não é original e você pode ser uma vítima de falsificação de software. Evite interrupções e mantenha seus arquivos seguros com o Office original hoje mesmo. <span style="float: right;">Obtenha o Office original Saiba mais</span>																									
O26																									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U					
2	Rotação nominal dos motores	1.000	rpm;	<b>ECO2=FC×CF</b>																					
3	Número de motores principais	3	<b>CO2 = 3,144 Kg CO2/Kg</b>																						
4	Modelo dos motores principais	Wärtsilä 8L20;	<b>5.2 AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DA CONFIGURAÇÃO ATUAL (DIESEL CONVENCIONAL)</b>																						
5	SFOC	194	g/kWh	Cenário 01				Cenário 02				* <sup>1</sup> Calcular a potência de instalação total. Como sabemos que há 3 motores, basta calcular os 3 motores pela potência de cada um Ptotal 3 x 1600 4800 Kw													
6	S (ENXOFRE)	3.5	%	CO2 hora	2899.76	KG CO2/h	CO2 hora	2899.76	KG CO2/h																
7	CO2	3.114	kg CO2 / kg combustível	CO2 ano	11657022.34	KG CO2/ano	CO2 ano	25401869.57	KG CO2/ano																
8	NOx	14.4	g/kWh	<b>ESOX=mccombustível×S×20</b>																					
9	PM	0.9	g/kWh	<b>SOX P/ S=3,5%</b>																					
10	preço combustível	474.5	t	Cenário 01				Cenário 02				Comsumo diário 12 h FC(d) = P × t × SFOC 11174400 11174.4 KG Comsumo anual 4020 h FC(a)= P × t × SFOC 3743424000 3743424 KG FC = P × t × SFOC													
11			SOX hora	651.84	KG SOX/h	SOX hora	651.84	KG SOX/h																	
12			SOX dia	7822.08	KG SOX/dia	SOX dia	15644.16	KG SOX/dia																	
13			SOX ano	2620396.8	KG SOX/ano	SOX ano	5710118.40	KG SOX/ano																	
14			<b>ENOX=Pgerada×FENO</b>																						
15			<b>NOx = 14,4 g/kWh</b>																						
16			Cenário 01				Cenário 02				Comsumo diário 24 h FC(d) = P × t × SFOC 22348800 22348.8 KG Comsumo anual 8760 h FC(a)= P × t × SFOC 8157312000 8157312 KG FC(h) = P x t x SFOC 931200 931.2 kg														
17			NOx hora	69120.00	69.12	KG SOX/h	NOx hora	69120.00	69.12	KG SOX/h															
18			NOx dia	829440.00	829.44	KG SOX/dia	NOx dia	1658880.00	1658.88	KG SOX/dia															
19			NOx ano	277862400.00	277862.4	KG SOX/a	NOx ano	605491200.00	605491.2	KG SOX/ano															
20			<b>EPM=Pgerada×FEPM</b>																						
21			<b>PM = 0,9 g/kWh</b>																						
22			Cenário 01				Cenário 02																		
23			PM hora	4320	4.32	KG PM/h	PM hora	4320	4.32	KG PM/h															
24			PM dia	51840	51.84	KG PM/dia	PM dia	103680	103.68	KG PM/dia															
25			PM ano	17366400	17366.4	KG PM/an	PM ano	37843200	37843.2	KG PM/ano															

# APÊNDICE B – PLANILHA DE CÁLCULO DOS GASES MODELO HÍBRIDO COM HFO

3ª Emissões de gases														
1	Potência por motor	1.600	kW											
2	Rotação nominal dos motores	1.000	rpm;		ECO2=FC*CF									
3	Número de motores principais	3	CO2 = 3,144 Kg CO2/Kg (- 15 %)											
4	Modelo dos motores principais	Wartsila 6L20;	Cenário 01				Cenário 02				5.2 AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DA CONFIGURAÇÃO ATUAL (DIESEL CONVENCIONAL)			
5	SFOC	194	g/kWh		CO2 hora	2464,79	KG CO2/h		CO2 hora	2464,79	KG CO2/h		1ª Calcular a potência de instalação total. Como sabemos que há 3 motores, basta calcular os 3 motores pela potência de cada um. Protal 3 x 1600 4800 Kw	
6	S (ENXOFRE)	3.5	%		CO2 dia	29577,519	KG CO2/dia		CO2 dia	59155,04	KG CO2/dia		2ª Consumo específico de combustível	
7	CO2	3.114	kg CO2 / kg combustível		CO2 ano	9908468,99	KG CO2/ano		CO2 ano	21591589,13	KG CO2/ano		Cenário 01, embarcação opera 12h/dia, durante 335 dias, Cenário 02, embarcação opera 24h/dia, durante 365 dias. 3743,424	
8	NOx	14.4	g/kWh		ESOX=combustivel*S*20									
9	PM	0.9	g/kWh		NOx = 14,4 g/kWh (- 15 %)									
10	preço combustível	474,5	t		Cenário 01				Cenário 02				FC = P x t x SFOC	
11					SOX hora	554,064	KG SOX/h		SOX hora	554,064	KG SOX/h		Cenário 01	
12					SOX dia	6648,768	KG SOX/dia		SOX dia	13297,536	KG SOX/dia		FC(d) = P x t x SFOC	
13					SOX ano	2227337,28	KG SOX/ano		SOX ano	4853600,64	KG SOX/ano		Consumo diário 12 h	
14					ENOX=Pgerada*FENO								Consumo anual 4020 h	
15					PM = 0,9 g/kWh (- 15 %)								FC(a)= P x t x SFOC	
16					Cenário 01				Cenário 02				Consumo diário 24 h	
17					NOx hora	58752,00	KG SOX/h		NOx hora	58752,00	KG SOX/h		Consumo anual 8760 h	
18					NOx dia	705024,00	KG SOX/dia		NOx dia	1410048,00	KG SOX/dia		FC(h) = P x t x SFOC	
19					NOx ano	236183040,00	KG SOX/ano		NOx ano	514667520,00	KG SOX/ano		Consumo hora 931200 931,2 kg	
20					EPM=Pgerada*FEPM								791,52	
21					PM = 0,9 g/kWh (- 15 %)									
22					Cenário 01				Cenário 02					
23					PM hora	3672	KG PM/h		PM hora	3672	KG PM/h			
24					PM dia	44064	KG PM/dia		PM dia	88128	KG PM/dia			
25					PM ano	14761440	KG PM/ano		PM ano	32166720	KG PM/ano			

## APÊNDICE C – PLANILHA DE CÁLCULO DOS GASES MODELO HÍBRIDO COM MGO

OBTENHA O OFFICE ORIGINAL Sua licença não é original e você pode ser uma vítima de falsificação de software. Evite interrupções e mantenha seus arquivos seguros com o Office original hoje mesmo.										Obtenha o Office original		Saiba mais									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	
1	Potência por motor	1.600	kW	<b>3ª Emissões de gases</b>																	
2	Rotação nominal dos motores	1.000	rpm;	$ECO2=FC \times CF$																	
3	Número de motores principais	3		<b>CO2 = 3,206 Kg CO2/Kg (- 30 %)</b>																	
4	Modelo dos motores principais	Wartsilä 8L20,		Cenário 01				Cenário 02				<b>5.2 AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DA CONFIGURAÇÃO ATUAL (DIESEL CONVENCIONAL)</b>									
5	SFOC	185	g/kWh	CO2 hora	2846,93	KG CO2/h	CO2 hora	1992,85	KG CO2/h	1ª Calcular a potência de instalação total. Como sabemos que há 3 motores, basta calcular os 3 motores pela potência de cada um. Pototal 3 x 1600 4800 Kw											
6	S (ENXOFRE)	0,5	%	CO2 dia	23914,195	KG CO2/dia	CO2 dia	47828,39	KG CO2/dia	2ª Consumo específico de combustível Cenário 01, embarcação opera 12h/dia, durante 335 dias. Cenário 02, embarcação opera 24h/dia, durante 365 dias.											
7	CO2	3,206	kg CO2 / kg combustível	CO2 ano	8011255,39	KG CO2/ano	CO2 ano	17457362,5	KG CO2/ano	3569,76											
8	NOx	13,5	g/kWh	$ESOX=mc \times combustivel \times S=20$																	
9	PM	0,4	g/kWh	<b>SOX PI S = 0,5% (-30%)</b>																	
10	preço combustível	474,5	t	Cenário 01				Cenário 02				Consumo diário Consumo anual									
11				SOX hora	62,16	KG SOX/h	SOX hora	62,16	KG SOX/h	Cenário 01								Cenário 02			
12				SOX dia	745,92	KG SOX/dia	SOX dia	1491,84	KG SOX/dia	FC(d) = P x t x SFOC								FC(a) = P x t x SFOC			
13				SOX ano	249883,2	KG SOX/ano	SOX ano	544521,60	KG SOX/ano	FC = P x t x SFOC								Consumo hora			
14				$ENox=P_{gerada} \times FENO$																	
15				<b>NOx = 13,5 g/kWh (- 30 %)</b>																	
16				Cenário 01				Cenário 02				Consumo hora									
17				NOx hora	45360,00	45,36 KG SOX/h	NOx hora	45360,00	45,36 KG SOX/h	FC(h) = P x t x SFOC								Consumo hora			
18				NOx dia	544320,00	544,32 KG SOX/dia	NOx dia	1088640,00	1088,64 KG SOX/dia	Consumo hora								Consumo hora			
19				NOx ano	182347200,00	182347,2 KG SOX/ano	NOx ano	397353600,00	397353,6 KG SOX/ano	Consumo hora								Consumo hora			
20				$EPM=P_{gerada} \times FEPIM$																	
21				<b>PM = 0,4 g/kWh (- 30 %)</b>																	
22				Cenário 01				Cenário 02				Consumo hora									
23				PM hora	1344	1,344 KG PM/h	PM hora	1344	1,344 KG PM/h	Consumo hora								Consumo hora			
24				PM dia	16128	16,128 KG PM/dia	PM dia	32256	32,256 KG PM/dia	Consumo hora								Consumo hora			
25				PM ano	5402880	5402,88 KG PM/ano	PM ano	11773440	11773,44 KG PM/ano	Consumo hora								Consumo hora			
26				Consumo hora																	

## ANEXO A – SFOC DO HFO

WÄRTSILÄ 20

## 3. Technical data tables

<b>Diesel engine Wärtsilä 8L20</b>		ME	AE	AE	AE	AE
Engine speed	RPM	1000	720	750	900	1000
Engine output	kW	1440	1040	1080	1360	1440
Engine output	HP	1960	1410	1470	1850	1960
Cylinder bore	mm			200		
Stroke	mm			280		
Swept volume	dm <sup>3</sup>			70,4		
Compression ratio				15		
Compression pressure, max.	bar	167	150	150	167	167
Firing pressure, max.	bar	185	170	170	185	185
Charge air pressure at 100% load	bar			0,3		
Mean effective pressure	bar	24,6	24,6	24,6	25,8	24,6
Mean piston speed	m/s	9,3	6,7	7	8,4	9,3
Idling speed	RPM	350				
<b>Combustion air system</b>						
Flow of air at 100% load	kg/s	2,86	1,96	2,04	2,79	2,98
Ambient air temperature, max.	°C			45		
Air temperature after air cooler	°C			45...60		
Air temperature after air cooler, alarm	°C			75		
<b>Exhaust gas system</b>						
Exhaust gas flow (100% load)	3) kg/s	2,94	2,02	2,1	2,87	3,06
Exhaust gas flow ( 85% load)	3) kg/s	2,5	1,74	1,81	2,48	2,67
Exhaust gas flow ( 75% load)	3) kg/s	2,18	1,57	1,62	2,24	2,41
Exhaust gas flow ( 25% load)	3) kg/s	1,44	1,11	1,15	1,61	1,76
Exhaust gas temp. after turbocharger (100% load)	1) 3) °C	350	360	360	350	340
Exhaust gas temp. after turbocharger ( 85% load)	1) 3) °C	355	360	360	340	340
Exhaust gas temp. after turbocharger ( 75% load)	1) 3) °C	360	360	360	340	340
Exhaust gas temp. after turbocharger ( 50% load)	1) 3) °C	390	370	370	350	350
Exhaust gas back pressure drop, max.	kPa			3		
Diameter of turbocharger connection	mm			300		
Exhaust gas pipe diameter, min.	mm	400	350	350	400	400
Calculated dia for 35 m/s	mm	433	362	369	428	438
<b>Heat balance</b>						
Jacket water	2) 3) kW	330	244	254	307	330
Charge air	kW	442	306	322	407	442
Lubricating oil	kW	219	162	167	204	219
Exhaust gases	kW	1057	684	708	890	943
Radiation	kW	82	55	57	74	76
<b>Fuel system</b>						
Pressure before injection pumps	kPa (bar)			600(6)		
Pump capacity, MDF, engine driven	m <sup>3</sup> /h	1,92	1,48	1,54	1,73	1,92
Fuel consumption (100% load)	3) g/kWh	199	192	192	191	192
Fuel consumption ( 85% load)	3) g/kWh	198	193	193	190	191
Fuel consumption ( 75% load)	3) g/kWh	198	194	194	190	192
Fuel consumption ( 50% load)	3) g/kWh	203	202	202	199	199
Leak fuel quantity, clean MDF fuel (100% load)	kg/h	1,2	0,8	0,9	1,1	1,2