



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CAMILA NEGRÃO COSTA

SISTEMA DE PROPULSÃO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE
SUA APLICAÇÃO NO CORREDOR NORTE DE NAVEGAÇÃO

TUCURUÍ

2025

CAMILA NEGRÃO COSTA

SISTEMA DE PROPULSÃO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE
SUA APLICAÇÃO NO CORREDOR NORTE DE NAVEGAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
como requisito parcial para a obtenção de
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica,
pela Universidade Federal do Pará.

Orientador:
Profa. Dra. Andrécia Pereira da Costa.

Coorientadora: Profa. Dra. Juliete da Silva
Souza.

TUCURUÍ

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N385s NEGRÃO COSTA, CAMILA.
SISTEMA DE PROPULSÃO: UMA REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA SOBRE SUA APLICAÇÃO NO CORREDOR
NORTE DE NAVEGAÇÃO / CAMILA NEGRÃO COSTA. —
2025.
44 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^a. Dra. Andrécia Pereira da Costa
Coorientação: Prof^a. Dra. Juliete da Silva Souza
Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade Federal do
Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia
Elétrica, Tucuruí, 2025.

1. Propulsores. 2. Empurradores. 3. sistema convencional.
4. sistema diesel-elétrico. 5. sistema híbrido. I. Título.

CDD 620.001171

CAMILA NEGRÃO COSTA

SISTEMA DE PROPULSÃO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE SUA
APLICAÇÃO NO CORREDOR NORTE DE NAVEGAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Pará.

Data de aprovação: 16/09/2025

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Orientadora

Andrécia Pereira da Costa
FEE/CAMTUC/UFGA

Profa. Dra. Coorientadora

Juliete da Silva Souza - IFCE

Prof. Dr. membro interno

Ewerton Ramos Granhen
FEE/CAMTUC/UFGA

Prof. Eng. membro interno

Lucas Marcley Carvalho dos Santos
FEE/CAMTUC/UFGA

TUCURUÍ

2025

	UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
	CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUI
	FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

TÍTULO: SISTEMA DE PROPULSÃO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE SUA APLICAÇÃO NO CORREDOR NORTE DE NAVEGAÇÃO
--

DISCENTE: CAMILA NEGRÃO COSTA MATRÍCULA: 201733940033
--

#	BANCA EXAMINADORA	CONDIÇÃO
1	Profa. Dra. Andrécia Pereira da Costa, FEE/CAMTUC/UFPA	Orientador
2	Profa. Dra. Juliete da Silva Souza, IFCE	Coorientador
3	Prof. Dr. Ewerton Ramos Granhen, FEE/CAMTUC/UFPA	Membro
4	Prof. Eng. Lucas Marclely Carvalho dos Santos, FEE/CAMTUC/UFPA	Membro

Data da Defesa: 16/09/2025	Hora Início: 08:33	Hora Término: 09:08
----------------------------	--------------------	---------------------

Trabalho Escrito (0 a 10 pontos por critério)	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3	Examinador 4
Formatação	8,0	7,0	8,5	8,0
Linguagem (gramática e semântica)	8,0	7,5	8,0	8,0
Conteúdo técnico	7,0	6,0	7,5	8,0

Defesa Oral (0 a 10 pontos por critério)	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3	Examinador 4
Sequência lógica de apresentação	7,5	6,5	7,5	7,5
Administração do tempo	8,5	7,0	8,5	9,0
Expressão oral	8,5	8,0	8,5	10
Domínio do tema	8,5	8,0	8,0	10

Média por examinador	8,0	7,14	8,07	8,64
Média Final	7,96			
Conceito Final	BOM			

Tucuruí-PA, 16/09/2025.

Documento assinado digitalmente
 ANDRÉCIA PEREIRA DA COSTA
 Data: 16/09/2025 10:13:01-0300
 Verifique em <https://validar.br.gov.br>

Orientador

Documento assinado digitalmente
 JULIETE DA SILVA SOUZA
 Data: 16/09/2025 10:37:41-0300
 Verifique em <https://validar.br.gov.br>

Coorientador

Documento assinado digitalmente
 EWERTON RAMOS GRANHEN
 Data: 16/09/2025 12:03:50-0300
 Verifique em <https://validar.br.gov.br>

Membro

Documento assinado digitalmente
 LUCAS MARCLELY CARVALHO DOS SANTOS
 Data: 16/09/2025 10:16:19-0300
 Verifique em <https://validar.br.gov.br>

Membro

Dedico este trabalho de conclusão a minha família, onde todos os momentos da minha graduação estiveram ao meu lado, sempre apoiando e acreditando na minha capacidade! Em especial, dedico este trabalho à minha avó Maria José, que pela vontade divina não está presente nesse momento tão aguardado, e ao meu Avô Manoel José, a quem irei sempre amar e cuidar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente aos meus pais e avós, Rutilene Maria, Miguel Reis, Maria José, Manoel José e Raimunda Costa, por todo apoio dedicado a minha formação como pessoa e profissional, sem o sustento emocional e incentivo deles, nada seria!

Agradeço ao apoio e à parceria de meu companheiro de vida, Lucas Serrão, que esteve ao meu lado nos momentos de dificuldade.

Agradeço também aos bons amigos que tive o privilégio de conhecer durante a árdua caminhada da graduação: Jaciane, Bruno, Gilzi, Eduardo, Alessandro e Daniel.

Agradeço com carinho à minha orientadora, Profa. Andrécia, e à coorientadora, Profa. Juliete, pelo apoio, dedicação e orientação ao longo de todo o processo.

Agradeço, por fim, aos excelentes professores que, com alegria, afirmo terem desempenhado o papel de grandes incentivadores e motivadores para o meu desenvolvimento profissional, mostrando que, com esforço e dedicação, tudo é possível. Professores Andrécia, Ewerton e Jefferson, vocês fizeram a diferença ao longo dessa caminhada de altos e baixos. Minha sincera gratidão!

"Educação não transforma o mundo. Educação muda as pessoas. Pessoas transformam o mundo."
(Paulo Freire).

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo sobre a versatilidade dos sistemas de propulsão dos empurradores que compõem o Corredor Norte de Navegação do Brasil. Inicialmente, aborda-se a evolução histórica dos sistemas de transporte marítimo empregados no deslocamento e escoamento de mercadorias. Em seguida, analisa-se, com base em artigos científicos e levantamento de dados, os principais arranjos de propulsão atualmente utilizados — o convencional (diesel-mecânico), o diesel-elétrico e, mais recentemente, o sistema híbrido, que integra motores a combustão e fontes elétricas de energia. Por meio dessa abordagem, são avaliadas as vantagens e limitações de cada sistema, destacando aspectos de eficiência energética, custo-benefício, impacto ambiental e adequação operacional, de modo a identificar qual configuração representa a melhor estratégia logística para a cadeia de produção.

Palavras-chave: Propulsores; empurradores; sistema convencional; sistema diesel-elétrico; sistema híbrido.

ABSTRACT

This work aims to present a study on the versatility of propulsion systems in towboats operating along Brazil's Northern Navigation Corridor. It first addresses the historical evolution of maritime transport systems used for the movement and distribution of goods. Then, based on scientific articles and data collection, it analyzes the main propulsion arrangements currently employed — the conventional (diesel-mechanical), the diesel-electric, and, more recently, the hybrid system that integrates combustion engines and electrical energy sources. Through this approach, the advantages and limitations of each system are assessed, highlighting aspects such as energy efficiency, cost-benefit, environmental impact, and operational suitability, in order to identify which configuration represents the best logistical strategy for the production chain.

Keywords: Propellers; push boats; conventional system; diesel-electric system; hybrid system.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Logística de grãos no Brasil	13
Figura 2 – Comparação entre modalidade de transporte por volume	14
Figura 3 – Supercomboio de 35 barcaças	15
Figura 4 – Barco movido a vela e remo	19
Figura 5 – Barco a vapor	19
Figura 6 – Componentes principais motores	22
Figura 7 – Bloco do motor CUMINS de 6 cilindros	23
Figura 8 – Diferentes arranjos de cilindros	23
Figura 9 – Pistão e biela	24
Figura 10 – Bico injetor de combustível	25
Figura 11 – Principais mecanismos para do sistema de conversão de um motor a combustão	26
Figura 12 – Diagrama unifilar elétrico	33
Figura 13 – Configuração diesel-elétrico	33
Figura 14 – Configuração diesel-mecânico	34
Figura 15 – Diagrama unifilar diesel-mecânico	35
Figura 16 – Configuração híbrida	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMPORT	<i>Associação dos Terminais Portuários e Estações de Transbordo de Cargas da Bacia Amazônica</i>
AZ1	<i>Sistema Azimutal</i>
BB	<i>Bombordo</i>
BE	<i>Boreste</i>
HBSA	<i>Hidrovias do Brasil S.A.</i>
CNT	<i>Confederação Nacional do Transporte</i>
CONAB	<i>Agência Nacional de Abastecimento</i>
CCM	<i>Centro de Controle de Máquinas</i>
DNIT	<i>Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes</i>
DG	<i>Diesel Gerador</i>
GNL	<i>Gás Natural Liquefeito</i>
MCP	<i>Motor de Combustão Principal</i>
MCA	<i>Motor de Combustão Auxiliar</i>
MIT	<i>Instituto de Tecnologia de Massachusetts (Massachusetts Institute of Technology)</i>
NORMAM	<i>Normas da Autoridade Marítimas</i>
PMS	<i>Ponto Morto Superior</i>
PMI	<i>Ponto Morto Inferior</i>
QEP	<i>Quadro de Energia Principal</i>
QEE	<i>Quadro de Emergência</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivos	17
1.3	Objetivos Específicos	17
1.4	Estrutura do Trabalho	17
2	EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE PROPULSÃO	18
3	MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA	21
3.1	Bloco do Motor	22
3.2	Cabeçote do Motor	25
3.3	Cárter do Motor	26
3.4	Ciclos de Trabalho de Motores a Combustão	27
4	CADEIA DE PRODUÇÃO	29
5	SISTEMA DE PROPULSÃO	32
5.1	Diesel - Elétrico	32
5.2	Diesel - Mecânico	33
5.3	Sistema Híbrido	35
5.4	Análise Comparativa dos Sistemas de Propulsão	37
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
	REFERÊNCIAS	40

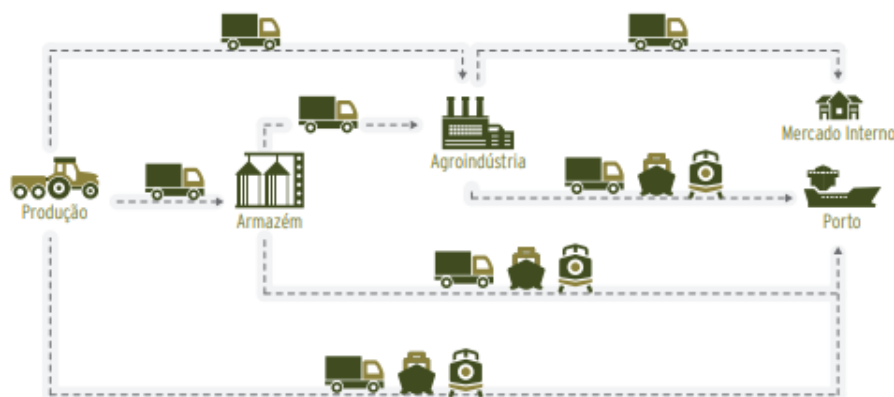
1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento tecnológico ao longo dos séculos, os sistemas e equipamentos evoluíram em paralelo à sociedade. No caso das embarcações, os mecanismos de geração e consumo de energia, bem como sua construção estrutural, passaram por profundas transformações, impulsionadas pelas necessidades operacionais e pelo surgimento de novas tecnologias. Essa evolução esteve diretamente associada à demanda por percorrer trajetos mais longos e transportar volumes maiores de carga, atingindo um marco importante no século XIX, com a transição dos sistemas de propulsão a vapor para os motores de combustão interna (PAPANIKOLAOU, 2019).

Para que o Brasil se desenvolvesse economicamente e mantivesse sua posição de destaque no agronegócio, especialmente na produção e exportação de grãos como soja, milho e café, foram necessárias estratégias específicas. Graças à sua localização territorial, clima favorável e diversidade de cultivos, o país alcançou, no início do século XXI, um crescimento exponencial na produção e exportação de grãos, (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB), 2024) tornando-se o maior exportador mundial de soja em 2020, à frente de grandes potências econômicas como Estados Unidos, Argentina e China. Essa expansão aumentou a demanda por transporte de grandes volumes de carga, exigindo aprimoramento dos modais logísticos (BALLOU, 2006).

O envio dos produtos para os portos de exportação envolve um arranjo intermodal de transporte, que pode incluir caminhões, ferrovias, barcaças e navios. A figura 1 ilustra como o Brasil se caracteriza quanto à distribuição dos grãos para consumo interno e exportação. Assim, o desenvolvimento econômico brasileiro está diretamente ligado à eficiência logística, que permite escoar grandes volumes de produção em menor tempo, garantindo competitividade no mercado internacional (RODRIGUES, 2007).

Figura 1 – Logística de grãos no Brasil



Fonte: (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE (DNIT), 2024)

No Brasil, maior produtor de soja do mundo, a localização estratégica dos portos destinados à exportação em sua maioria em áreas litorâneas, distantes dos principais produtores tornou necessária a busca por modos eficazes e rentáveis de interligar esses pontos no menor tempo possível, possibilitando o transporte de grandes volumes de carga por viagem. Nesse contexto, surgiram empresas de logística voltadas para o modal hidroviário, com foco na eficiência, redução de custos operacionais, maior capacidade de transporte, baixo impacto ambiental e diminuição de congestionamentos nas vias terrestres paralelas (TACLA, 2003).

O arco norte da navegação é composto de portos localizados na região Norte e Nordeste do Brasil, sendo eles: Miritituba (PA), Santarém (PA), Barbacena (PA), Porto Velho (RO), Itacoatiara (AM), Manaus (AM) e Itaquí (MA), destacam-se ano após ano por viabilizarem ao agricultor a redução de gastos em razão do maior volume de carga transportada por viagem, sendo esses os principais portos de exportação de produtos agrícolas do país. Segundo a Associação dos Terminais Portuários e Estações de Transbordo de Cargas da Bacia Amazônica (AMPORT), o Arco Norte poderá concentrar até 50% da exportação nacional de soja e milho até 2030 (AMPORT, 2025).

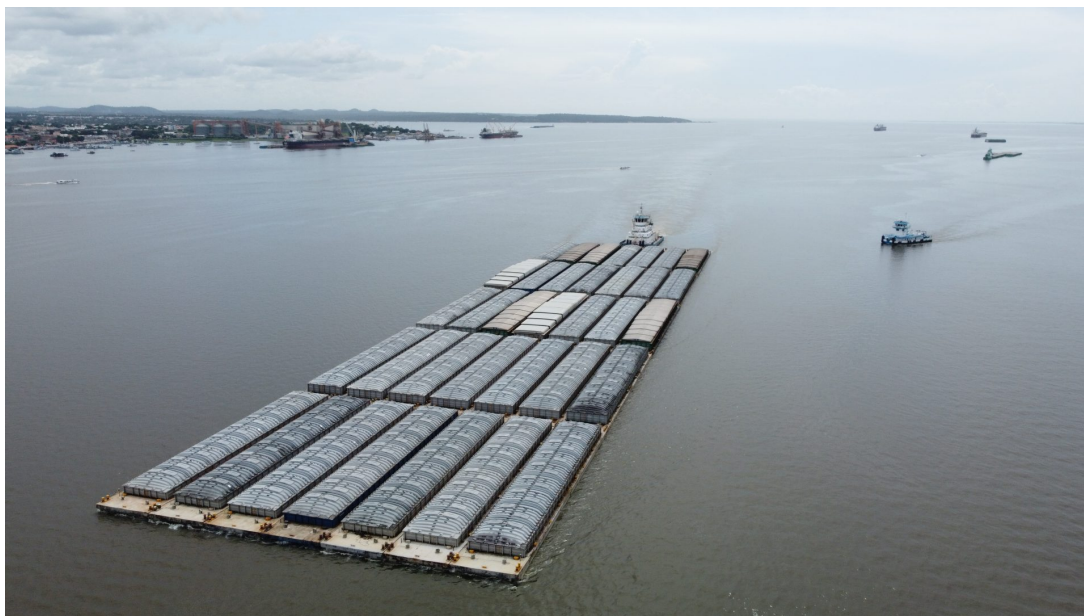
No Pará, os portos se destacam devido às inovações no setor. Em fevereiro de 2023, a Hidrovias do Brasil S/A (HBSA) recebeu autorização da Marinha e dos órgãos competentes para operar o trajeto entre Barcarena e Itaituba com o maior comboio fluvial do país, composto por 35 barcas e um empurrador, com capacidade de transportar até 70 mil toneladas de grãos em apenas cinco dias de viagem, fomentando novas possibilidades de crescimento no estado. Para transportar o mesmo volume de carga, seriam necessários cerca de 2.000 caminhões de 35 toneladas cada ou 1.000 vagões de 70 toneladas, evidenciando a eficiência do super comboio fluvial, conforme a configuração das 35 barcas ilustrada na figura 2. Na figura 3 observa-se o comboio completo navegando carregado.

Figura 2 – Comparação entre modalidade de transporte por volume

	MODALIDADE	COMBOIO	ESPECIFICAÇÃO	TOTAL
	NAVEGAÇÃO INTERIOR	1 comboio	35 chatas	70.000 t
	FERROVIÁRIO	33,3 comboios (hopper)	1.000 vagões de 70 toneladas	70.000 t
	RODOVIÁRIO	-	2.000 carretas de 35 toneladas	70.000 t

Fonte: (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT), 2023)

Figura 3 – Supercomboio de 35 barcaças



Fonte: ([HIDROVIAS DO BRASIL S.A., 2023](#))

A Hidrovias do Brasil, empresa de soluções logísticas integradas, oferece não apenas a possibilidade de uma navegação mais eficiente com maior volume de carga, mas também inovações tecnológicas que destacam o estado do Pará. Entre elas estão os empurradores híbridos, denominados HB Enguia e HB Poraquê, que funcionam com um arranjo de geradores diesel e bancos de baterias, além do primeiro simulador de manobras do setor privado voltado para o aperfeiçoamento de seus profissionais, incluindo comandantes, pilotos e marinheiros fluviais. No simulador, os tripulantes podem treinar e aprimorar seus conhecimentos em manobras, tanto em condições normais quanto em situações críticas de navegação. Isso demonstra que, apesar das vantagens oferecidas pelo estado, ainda existem desafios à navegação, como períodos de escassez de chuvas, trechos estreitos e alta incidência de sismos na região ([BERTRAM, 2011](#)).

Para que a navegação seja eficiente, é necessário que os empurradores forneçam potência suficiente para movimentar todo o comboio de barcas pelos rios. É importante diferenciar as configurações de propulsão: na navegação fluvial, os empurradores requerem maior potência para percorrer longos trajetos com cargas volumosas, enquanto no apoio portuário o arranjo prioriza a manobrabilidade, com menor exigência de potência. Os empurradores de apoio portuário não são projetados para trajetos extensos ou grandes volumes de carga; sua função é realizar manobras de suporte, como montar a formação de comboios, atuar como batedores e auxiliar no carregamento ou descarregamento de grãos nos terminais. Já os empurradores troncais necessitam de maior potência energética para percorrer longas distâncias com grandes volumes de carga ([MOTT, 2013](#)).

O presente trabalho teve como objetivo estudar os empurradores no Corredor Norte de Navegação, analisando os tipos de propulsores utilizados. Para isso, adotou-se uma

abordagem de pesquisa comparativa, fundamentada principalmente em revisão bibliográfica e na análise de dados obtidos por meio de artigos acadêmicos, relatórios técnicos e fontes jornalísticas.

A pesquisa teve início com uma revisão de artigos, livros, relatórios e estudos técnicos sobre os empurradores no contexto da navegação fluvial da região Norte do Brasil, destacando o uso dessas embarcações como meio eficiente de transporte de cargas.

A metodologia também contemplou uma análise comparativa dos diferentes tipos de sistemas de propulsão, considerando critérios como eficiência energética, desempenho em diversos tipos de rios e regimes hidrológicos, custo-benefício e impacto ambiental. Dessa forma, foi possível realizar uma avaliação do tema, de maneira a oferecer uma visão clara sobre os empurradores empregados na região, bem como seus impactos na navegação do Corredor Norte e na interligação com outros estados, fator essencial para o escoamento de uma cadeia produtiva dependente da diversidade funcional desses sistemas.

1.1 Justificativa

O sistema de transporte fluvial desempenha papel fundamental na economia e na infraestrutura logística do Brasil, especialmente na região Norte, onde a navegação pelos rios e pela costa marítima é essencial para a integração econômica e o desenvolvimento das localidades. Os navios empurradores, responsáveis pelo transporte de cargas pesadas e volumosas, possuem sistemas de propulsão altamente especializados, vitais para operar em condições adversas, como os períodos de cheia e seca do corredor Norte, que alteram os níveis dos rios e afluentes.

No estado do Pará, rios e portos fluviais constituem as principais vias de transporte de mercadorias, sendo os empurradores essenciais para a movimentação de grandes volumes de carga por meio das barcaças, especialmente em regiões com infraestrutura portuária limitada e características hidrológicas complexas. Esses navios são projetados para garantir manobrabilidade em canais estreitos e águas rasas, comuns na região, além de oferecer maior capacidade de transporte e eficiência em longas distâncias.

A relevância dos sistemas de propulsores dos empurradores vai além da eficiência logística, representando uma solução estratégica para a sustentabilidade das operações no corredor Norte, ao permitir o uso otimizado dos rios e minimizar impactos ambientais e operacionais.

O estudo da tecnologia empregada nesses sistemas de propulsão é essencial para compreender sua contribuição na competitividade e no desenvolvimento econômico regional.

Portanto, este trabalho tem como objetivo explorar a importância dos sistemas de propulsão dos navios empurradores, sejam eles convencionais ou diesel-elétricos, no transporte fluvial da região Norte do Brasil. A pesquisa aborda desde a evolução tecno-

lógica desses sistemas até sua aplicação prática, destacando os benefícios econômicos e ambientais que proporcionam. A compreensão aprofundada desse tema é fundamental para o planejamento e implementação de políticas públicas voltadas à melhoria da infraestrutura e à eficiência do transporte hidroviário, fortalecendo a integração do Norte com outras regiões do país e promovendo o desenvolvimento econômico por meio das empresas privadas.

1.2 Objetivos

Descrever o funcionamento dos motores a diesel e analisar como as configurações de arranjo de propulsão influenciam o tipo de embarcação utilizada no Corredor Norte de Navegação para o transporte de grãos.

1.3 Objetivos Específicos

- Avaliar o surgimento dos sistemas de propulsão modernos;
- Compreender a construção e configuração básica dos motores de combustão;
- Entender o princípio de funcionamento dos motores a diesel;
- Diferenciar os arranjos de propulsão e suas especificidades de aplicação;
- Demonstrar as diferenças entre os sistemas de propulsão convencional e diesel-elétrico.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em seis Capítulos.

O Capítulo 1 é introdutório e apresenta a justificativa, os objetivos e a estrutura do trabalho desenvolvido.

No Capítulo 2, é apresentado o contexto histórico das embarcações e como elas evoluirão segundo seu mecanismo de propulsão.

O Capítulo 3 aborda a construção básica e funcionamento de motores a combustão, sendo essa a forma primária de energia dos mecanismos do empurrador.

No Capítulo 4, são analisados os tipos de propulsão mais utilizados atualmente, o diesel-elétrico e o diesel-mecânico.

No Capítulo 5 é exibido o sistema de propulsão.

Finalmente, no Capítulo 6, são discutidas as considerações finais. Além disso, são incluídas as referências bibliográficas.

2 EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE PROPULSÃO

O crescimento econômico de um país advém da capacidade de expansão do comércio nacional e internacional. Para que haja um desenvolvimento significativo, é imprescindível o investimento em tecnologias, aprimorando os métodos de transporte de cargas de acordo com a vazão da produção. A propulsão é o processo destinado a gerar a energia necessária para modificar o movimento de translação de um corpo, comumente por meio de maquinário denominado propulsor. Ao longo da história, é possível identificar diversos mecanismos e técnicas empregados para promover a propulsão de navios, os quais refletem o contexto histórico de cada período ([PAPANIKOLAOU, 2019](#)).

Sabe-se que os sistemas de propulsão e a estrutura naval das embarcações foram aprimorados com a evolução das civilizações e, especialmente, com as revoluções industriais ocorridas nos países desenvolvidos. O desenvolvimento das civilizações foi fortemente influenciado pela viabilidade de viagens marítimas por meio de embarcações. Relatos históricos datados de 3000 a.C., provenientes das civilizações egípcias, mostram que utilizavam barcos movidos a remos, empregando a força física dos remadores para o transporte de pessoas, a troca de mercadorias e possíveis conflitos ([PAPPE, 2001](#)).

Posteriormente, com a necessidade de navegar por maiores distâncias em busca de novos territórios e de trocas comerciais entre povoados, surgiu, por volta do século XV, o uso de barcos a vela. Inicialmente, estes funcionavam de forma híbrida, combinando o sistema de velas com os remos; após a consolidação da propulsão a vela, o uso de remos caiu em desuso. A figura 4 mostra a configuração dos barcos predominantes nessa época ([FERREIRA, 2010](#)).

O declínio desse sistema de propulsão ocorreu com a invenção das máquinas a vapor, tecnologia que marcou o início da Revolução Industrial inglesa, no século XVIII, simbolizando grande expansão e desenvolvimento industrial mundial. Essa inovação representou uma transição de grande impacto nos sistemas de propulsão de navios, ao substituir mecanismos dependentes da força humana e das condições climáticas, permitindo uma navegação mais eficiente e rápida ([STOPFORD, 2009](#); [BERTRAM, 2011](#)).

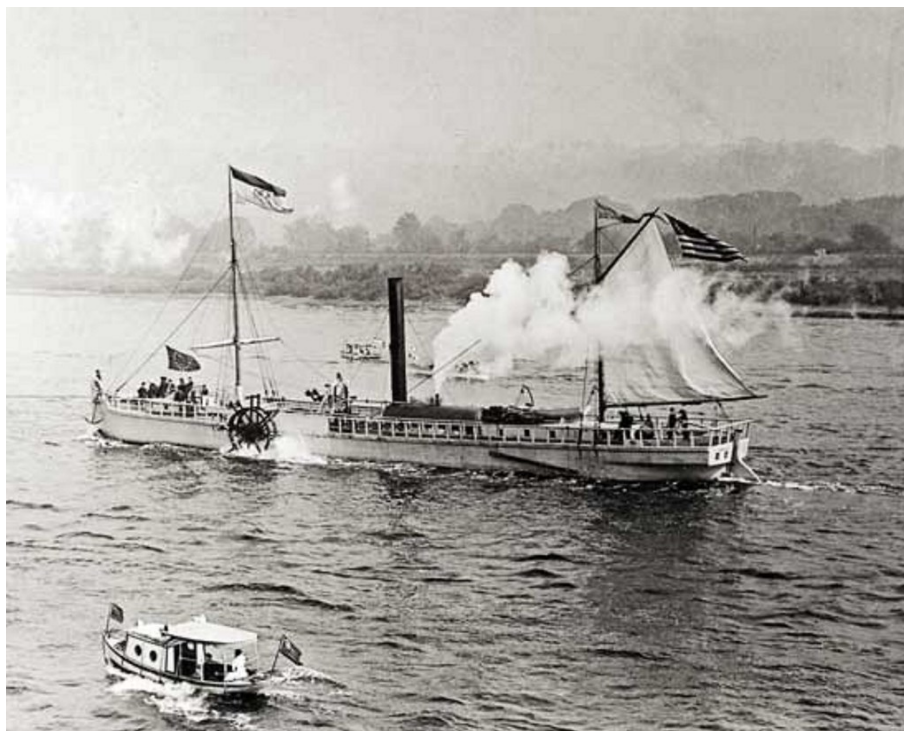
A propulsão por máquinas a vapor consistia na conversão de energia térmica em energia mecânica, obtida pelo superaquecimento da água através da queima de carvão, gerando vapor de alta pressão. Esse vapor era direcionado a um conjunto de cilindros com pistões; a inserção do vapor em alta temperatura produzia o movimento de empurrar e puxar, gerando um movimento vertical de sobe e desce, que, por meio de mecanismos específicos, era convertido em movimento de rotação das rodas ou hélices, impulsionando o navio ([GARCIA; SOUZA, 2017](#)). A figura 5, ilustra um barco a vapor.

Figura 4 – Barco movido a vela e remo



Fonte: ([NATIONAL GEOGRAPHIC, 2023](#))

Figura 5 – Barco a vapor



Fonte: ([LAURAANNEART, 2024](#))

Os barcos que utilizavam máquinas a vapor sinalizaram ao mundo a grande possibilidade de navegação por extensões maiores de mares e rios, abrindo caminho para novas rotas comerciais internacionais e estimulando o crescimento econômico ([LANDES, 1998](#); [MOKYR, 1990](#)). Apesar da eficiência e da comprovada capacidade de navegação dos

barcos a vapor, percebeu-se que, para o transporte de maiores volumes de mercadorias, seria necessário um espaço adicional para acondicionar a carga. No entanto, o robusto mecanismo de propulsão e o espaço requerido para o armazenamento de carvão limitavam essa capacidade ([STOPFORD, 2009](#)).

No final do século XIX e início do século XX, a incessante busca por sistemas de transporte que se caracterizassem por menor custo, maior potência e menor impacto ambiental estimulou o desenvolvimento de novas tecnologias ([BRUNETTI, 2012](#)). Esse contexto proporcionou avanços significativos nos sistemas de conversão de energia e potência, acelerando a substituição do sistema de propulsão baseado em máquinas a vapor ([PORTAL DE PERIÓDICOS DA MARINHA DO BRASIL, 2023](#)).

Ainda durante a Revolução Industrial, no final do século XIX, iniciou-se o estudo e o desenvolvimento de formas de propulsão que viriam a se consolidar como os motores a combustão interna, sistemas mais compactos, eficientes e capazes de gerar maior potência em relação ao espaço ocupado ([MARTINS, 2022](#)). Esses motores permitiram a construção de embarcações mais rápidas e com maior capacidade de carga, revolucionando o transporte marítimo e fluvial ([HIRSCH, 2019](#)).

A adoção dos motores a combustão interna também impulsionou melhorias nos materiais e na engenharia naval. Casco mais resistentes, sistemas de refrigeração e lubrificação aprimorados e o desenvolvimento de hélices mais eficientes permitiram que os navios operassem com maior segurança, confiabilidade e autonomia ([INFOESCOLA, 2025](#)). Esses avanços refletiram diretamente na expansão do comércio internacional e no fortalecimento das economias de países industrializados ([SCRIBD, 2025](#)).

Além do aumento da eficiência e da versatilidade das embarcações, a evolução dos motores a combustão favoreceu a integração de sistemas de controle automatizados a bordo, possibilitando o monitoramento em tempo real do desempenho do motor, do consumo de combustível e das condições de navegação ([BRUNETTI, 2012](#); [MARINHA DO BRASIL, 2015](#)). Essa modernização contribuiu para a redução de custos operacionais, otimização das rotas e maior segurança durante longas travessias, consolidando uma nova era de operação marítima e fluvial, marcada pela precisão, confiabilidade e sustentabilidade nos transportes. Dessa forma, a inovação tecnológica não apenas ampliou a capacidade operacional dos navios, mas também estabeleceu padrões mais elevados para a eficiência e a adaptação a diferentes demandas no setor naval.

3 MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA

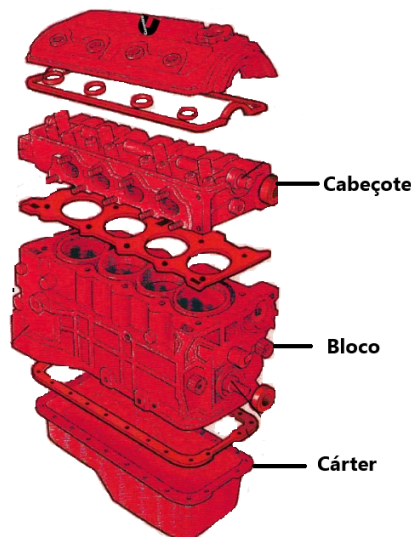
Ciência e tecnologia são ramos interdependentes para o desenvolvimento da sociedade. Desde 1652, quando o padre Hautefeuille idealizou a construção de um motor capaz de converter energia por meio da força expansiva da combustão de pólvora em um cilindro fechado, até 1878, quando o alemão Nikolaus August Otto apresentou seu motor de combustão interna do ciclo Otto na Feira Internacional de Paris, diversos matemáticos, físicos e engenheiros como Christiaan Huygens, Denis Papin e James Watt contribuíram para a consolidação desse mecanismo (HEYWOOD, 1988; LIMA, 2015).

Contudo, foi o alemão Rudolf Christian Karl Diesel quem aperfeiçoou o sistema que hoje é amplamente utilizado em automóveis, trens, navios e aviões. A diferença entre o motor a combustão que funciona no ciclo Otto e o ciclo Diesel está no modo como ocorre a mistura ar-combustível e a ignição. Nos motores do ciclo Otto, a ignição é promovida por uma centelha elétrica, enquanto, no motor do ciclo Diesel, a ignição é ocasionada pela compressão do ar, que eleva significativamente a temperatura no interior do cilindro, resultando na explosão da mistura (VARELLA; SANTOS, 2010).

Os motores a combustão são máquinas térmicas empregadas na geração de energia mecânica ou força motriz de acionamento. Dentro de suas finalidades, podem ser classificados segundo a quantidade e disposição dos cilindros, o ciclo de trabalho (Otto ou Diesel), o número de tempos (dois ou quatro) e o método de arrefecimento (HEYWOOD, 1988; BRUNETTI, 2012). O ciclo de dois ou quatro tempos refere-se à quantidade de cursos que o pistão realiza no virabrequim para que as etapas de admissão, compressão, combustão e exaustão sejam concluídas.

No presente trabalho, o enfoque será dado aos motores de combustão interna de ignição por compressão de quatro tempos, denominados apenas motores diesel. Independentemente de sua aplicação, esses motores obedecem a uma estrutura intrínseca de construção para garantir seu funcionamento adequado, a qual pode ser dividida em três principais elementos: cabeçote, bloco do motor e cárter, conforme ilustrado na figura 6.

Figura 6 – Componentes principais motores



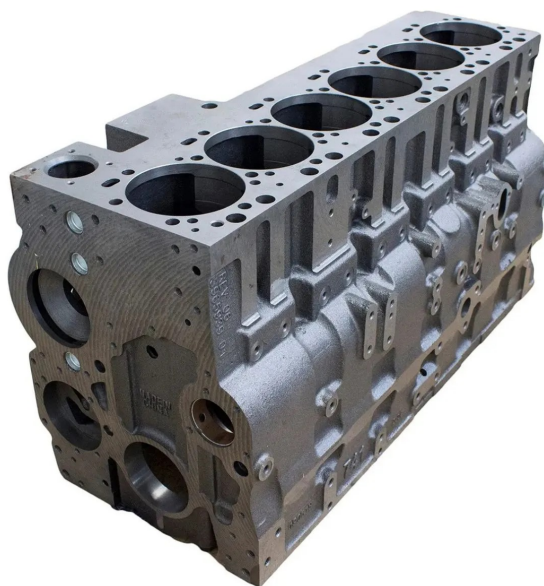
Fonte: (MÍNGUEZ S.A., 2021)

3.1 Bloco do Motor

Para o processo de transferência de energia mecânica ao sistema em que será empregado, é necessário possuir um meio capaz de suportar as altas temperaturas e pressões geradas durante a conversão de energia. Essa estrutura é denominada bloco do motor. Na figura 7 observa-se a estrutura individual de um bloco de seis cilindros. No bloco são alojados os mecanismos fundamentais para o funcionamento do motor, que incluem as camisas, pistões, bielas e a árvore de manivelas (ou virabrequim). A disposição dos cilindros cavidades cilíndricas abertas verticalmente da extremidade superior à inferior configura a estrutura básica do bloco. A quantidade e o arranjo dos cilindros variam conforme a aplicação do motor. Na figura 8, podem ser verificados alguns arranjos possíveis (MARTINS, 2022).

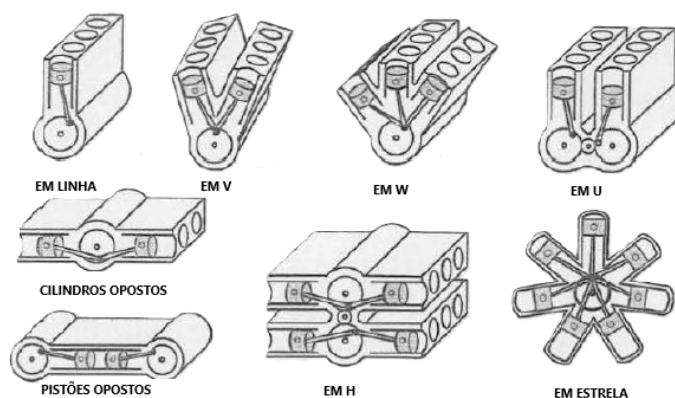
A peça fundamental para a eficácia do processo são as camisas, componentes estáticos inseridos no bloco, responsáveis por fornecer um revestimento liso e resistente, permitindo que o pistão se desloque com baixo atrito. As camisas também auxiliam na dissipação do calor gerado durante a combustão, prevenindo o superaquecimento e, conseqüentemente, prolongando a vida útil do motor. É importante salientar que o bloco do motor é a estrutura que abriga os cilindros, enquanto a camisa atua como proteção interna do cilindro, garantindo sua integridade e desempenho (HEYWOOD, 1988).

Figura 7 – Bloco do motor CUMINS de 6 cilindros



Fonte: ([ANCHIETA PEÇAS, 2025](#))

Figura 8 – Diferentes arranjos de cilindros



Fonte: ([DREAMSTIME, 2010](#))

O pistão, de formato cilíndrico, é responsável por converter a energia liberada na combustão em movimento linear dentro do cilindro. Durante o ciclo de quatro tempos do motor diesel — admissão, compressão, combustão e escape — o pistão percorre o trajeto entre o Ponto Morto Superior (PMS) e o Ponto Morto Inferior (PMI), transmitindo a força gerada para a biela. Esta, por sua vez, atua como elo de ligação entre o pistão e o virabrequim, transformando o deslocamento linear em movimento rotacional. Esse mecanismo conjunto possibilita a transferência de torque para a árvore de manivelas, assegurando o funcionamento contínuo do motor e o acionamento dos sistemas de propulsão ([FALASCHI, et al., 2018](#)).

Na parte superior do pistão existem ranhuras destinadas à alocação dos anéis de segmento, responsáveis pela vedação dos gases de combustão, enquanto outros anéis auxiliam na lubrificação do componente. A extremidade inferior do pistão é fixada à biela.

Considerando que se trata da conexão entre dois componentes rígidos sujeitos a altas pressões, a junção é feita por meio de um pino, projetado com alguns milímetros a menos que o encaixe, permitindo à biela uma pequena margem de movimento lateral. Isso reduz o atrito e evita aquecimento excessivo no mecanismo (FALASCHI, et al., 2018). Formada por uma haste metálica, a biela pode assumir forma e tamanho diferentes conforme a característica do sistema. A biela, formada por uma haste metálica, pode apresentar formas e dimensões diferentes dependendo das características do sistema. Na figura 9 é ilustrado o mecanismo de conexão entre a biela e o pistão.

Figura 9 – Pistão e biela



Fonte: (FREEPIK, 2023)

No mecanismo do motor, a biela utiliza o pistão como guia de movimento, tendo como função principal a conversão do movimento linear vertical do pistão em movimento rotacional na árvore de manivelas. Para isso, a biela é conectada à extremidade inferior do virabrequim.

O virabrequim é o eixo de manivelas responsável pela transferência de torque. Em sua ponta anterior, controla o acoplamento que, conectado a uma corrente ou correia dentada, movimenta o eixo de comando de válvulas, garantindo o ciclo de combustão. Na ponta posterior, transfere o torque ao acoplamento do volante do motor, sendo a principal fonte de energia para os mecanismos de propulsão. O virabrequim é apoiado por dois tipos de mancais: os fixos e os móveis, que conectam as bielas. Entre a extremidade inferior da biela e o eixo do virabrequim, é inserido um componente essencial para o mecanismo de lubrificação, garantindo uma rotação mais fluida e reduzindo o atrito: os casquilhos, também conhecidos como bronzinas (FALASCHI, et al., 2018; HEYWOOD, 1988).

Para facilitar a compreensão do mecanismo principal alocado no bloco do motor, pode-se fazer a seguinte analogia: imagine uma bicicleta. Para se locomover, é necessário aplicar uma força mecânica que resulta em movimento rotacional. A pessoa aplica energia ao pedal (equivalente ao pistão do motor), que está conectado à manivela (biela do motor). Esta manivela movimenta a corrente (árvore de manivelas), que transfere o torque gerado para diferentes componentes: em uma extremidade, devolve a energia ao comando de

válvulas do sistema, e na outra, alimenta o cassete (volante do motor), responsável por propagar a rotação às rodas (ou, no motor, aos mecanismos de propulsão).

3.2 Cabeçote do Motor

Na parte superior do bloco do motor encontra-se o cabeçote, geralmente fabricado em alumínio ou ferro fundido. Ele é responsável por fechar o sistema na parte superior e por alojar componentes essenciais, como as válvulas de admissão e escape, bicos injetores, engrenagens e o comando de válvulas (também denominado eixo ou árvore de cames) (FALASCHI, et al., 2018; HEYWOOD, 1988). Em cabeçotes convencionais, cada cilindro possui duas válvulas. Portanto, em um motor de seis cilindros, existem 12 válvulas: seis de admissão e seis de escape, responsáveis por controlar o fluxo de entrada e saída dos gases durante o processo de combustão.

Para que o ar seja admitido no interior do cilindro, a válvula de admissão abre antes do Ponto Morto Superior (PMS) do pistão e fecha logo após o Ponto Morto Inferior (PMI). Já a válvula de escape é responsável pela saída dos gases de combustão, funcionando de forma complementar à válvula de admissão: abre antes do PMI e fecha logo após o PMS, reiniciando o ciclo de admissão.

A fim de que o processo de ignição ocorra, é necessário adicionar ao sistema, entre a atuação das válvulas de admissão e escape, o componente que, sob alta pressão, provocará a combustão: o combustível. A introdução desse elemento é realizada pelo bico injetor, um mecanismo semelhante a uma seringa, com pequenas perfurações na ponta, responsável por pulverizar o combustível em finas partículas no interior da câmara de combustão. A quantidade de combustível liberada varia conforme as condições de operação, como rotação e temperatura. A deficiência desse mecanismo pode se manifestar por perda de potência do motor, aumento do consumo de combustível e falhas na aceleração, geralmente causadas pela obstrução dos canais de pulverização. Na figura 10 é ilustrado um bico injetor.

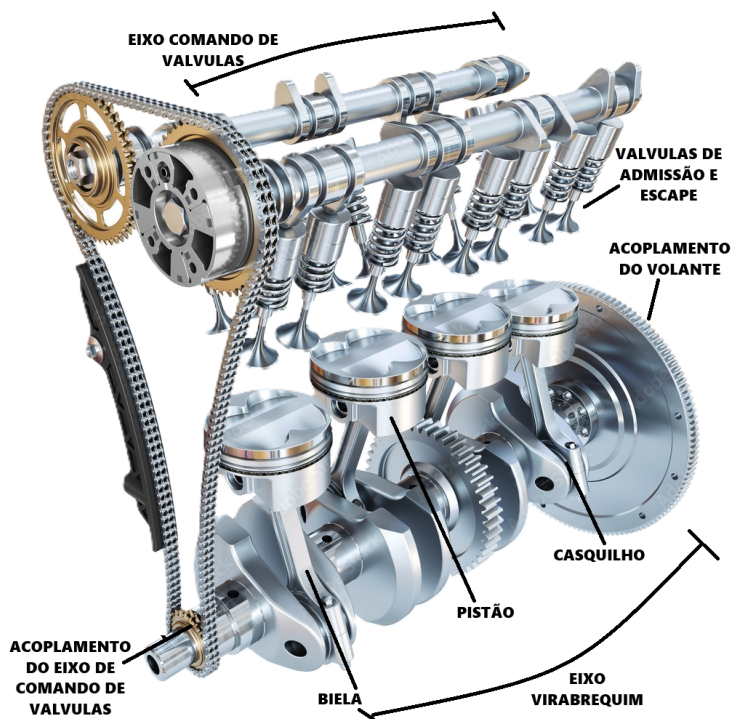
Figura 10 – Bico injetor de combustível



Fonte: (FREEPIK, 2023)

Com o objetivo de assegurar que o sistema de válvulas e o bico injetor atuem no momento correto do processo de combustão, é necessário um mecanismo que forneça informação sobre o ponto exato em que o ciclo deve reiniciar. Esse mecanismo é denominado eixo de cames ou comando de válvulas, conectado ao eixo do virabrequim por meio de uma correia dentada. Ele controla a abertura e o fechamento das válvulas por meio de ressaltos que atuam sobre elas, realizando seu movimento de rotação à metade da velocidade do virabrequim e em tempos precisos, garantindo que o ciclo de trabalho do motor ocorra corretamente. A figura 11 ilustra todos os componentes descritos até este ponto, destacando aqueles de maior atuação na transferência de energia gerada pelo processo de combustão.

Figura 11 – Principais mecanismos para do sistema de conversão de um motor a combustão



Fonte: (GARCIA, R.F., 2021)

3.3 Cáster do Motor

O motor a combustão é composto por diversos mecanismos metálicos em constante movimento, submetidos a altas temperaturas, o que exige um sistema responsável pela lubrificação e pela prolongação da vida útil do equipamento.

Para esse fim, o sistema de lubrificação circula óleo lubrificante pelos componentes do motor, sendo armazenado no cárter, peça metálica que compõe a parte inferior do motor. Sua principal função é armazenar todo o óleo necessário ao sistema e garantir a vedação da parte inferior do bloco do motor. No cárter, na sua porção superior, encontra-se acomodado

o eixo virabrequim, que transmite o movimento de rotação aos demais componentes do motor.

3.4 Ciclos de Trabalho de Motores a Combustão

Os motores a combustão são máquinas térmicas utilizadas para a geração de energia mecânica ou força motriz. Entre eles, os motores de combustão interna de ignição por compressão (ciclo Diesel) de quatro tempos são os mais empregados em empurradores da frota fluvial destinada ao transporte de grãos. O ciclo de trabalho desses motores é composto por quatro tempos: admissão, compressão, combustão e escape, sendo necessário que todos os sistemas do motor operem em perfeita sintonia para que os ciclos sejam executados corretamente, garantindo o desempenho projetado (FALASCHI, et al., 2018; HEYWOOD, 1988).

Diferentemente dos motores do ciclo Otto, nos quais a combustão ocorre pela ignição de uma mistura previamente formada de ar-combustível, por meio de uma centelha gerada pela vela de ignição, no ciclo Diesel a combustão se dá por auto-ignição. Nesse caso, o combustível é injetado diretamente no cilindro, onde o ar já foi comprimido a altas pressões e temperaturas, promovendo a ignição espontânea. O processo de expansão resultante converte a energia química do combustível em energia mecânica, transmitida ao eixo do virabrequim (FALASCHI, et al., 2018; HEYWOOD, 1988).

O ciclo de quatro tempos do motor Diesel se desenvolve da seguinte forma: no primeiro tempo (admissão), o pistão desce do Ponto Morto Superior (PMS) ao Ponto Morto Inferior (PMI), permitindo a entrada de ar através da válvula de admissão. No segundo tempo (compressão), o pistão sobe, comprimindo o ar, elevando sua pressão e temperatura, preparando o cilindro para a combustão. Durante o terceiro tempo (combustão/expansão), o combustível é injetado no cilindro, ocorre a auto-ignição, e o pistão é empurrado de volta ao PMI, realizando o trabalho mecânico principal do motor. No quarto tempo (escape), os gases resultantes da queima são expulsos através da válvula de escape, retornando o pistão ao PMS e encerrando o ciclo, pronto para reinício (FALASCHI, et al., 2018; HEYWOOD, 1988).

Além do ciclo de quatro tempos, o motor Diesel é composto por diversos componentes mecânicos fundamentais, como o bloco do motor, pistões, bielas, virabrequim, cabeçote e comando de válvulas. O bloco constitui a estrutura principal do motor, suportando os cilindros e alojando os mecanismos móveis. Os pistões se deslocam dentro dos cilindros, conectados às bielas, que transmitem o movimento linear para o virabrequim, convertendo-o em movimento rotacional. No cabeçote, são instaladas as válvulas de admissão e escape, além do bico injetor e do comando de válvulas, garantindo a correta sincronização do ciclo de combustão (FALASCHI, et al., 2018; HEYWOOD, 1988).

Outro sistema essencial para o bom funcionamento do motor Diesel é o sistema de lubrificação, responsável por reduzir o atrito entre as peças móveis, dissipar calor e prolongar a vida útil do equipamento. O óleo lubrificante circula pelos componentes do motor, sendo armazenado no cárter, localizado na parte inferior do bloco, onde também ocorre a vedação da parte inferior. O virabrequim gira dentro do óleo contido no cárter, e os casquilhos ou bronzinas auxiliam na redução de atrito e desgaste entre bielas e virabrequim (HEYWOOD, 1988).

O desempenho de um motor Diesel depende da geometria dos componentes e do controle preciso da injeção de combustível. Problemas como entupimento do bico injetor, desgaste das bronzinas ou falhas no comando de válvulas podem comprometer a potência e gerar superaquecimento (TAYLOR, 1985; HEYWOOD, 1988). Portanto, a manutenção adequada e o ajuste correto desses parâmetros são essenciais para garantir a confiabilidade e o desempenho ideal do motor Diesel.

4 CADEIA DE PRODUÇÃO

Os navios empurradores que compõem a frota fluvial do arco norte de navegação são regidos, desde a construção até a sua designação, por conjuntos de leis, normas, decretos e órgãos ligados às autoridades marítimas, responsáveis por assegurar, fiscalizar e acompanhar as atividades realizadas a bordo das embarcações, garantindo a segurança da navegação e a salvaguarda da vida humana nos rios. Esses órgãos também possuem papel importante no desenvolvimento de normas e leis que protejam todos aqueles que atuam como marítimos, desempenhando ainda a função de capacitação e atualização de profissionais da área. Os principais órgãos e normas que regem a navegação são a Marinha do Brasil e as Normas da Autoridade Marítima (NORMAM), ([MARINHA DO BRASIL, 2021](#); [FERREIRA; REIS, 2020](#)).

Para que uma embarcação seja construída ou modificada, é necessário atender a todas as normas regulamentadoras e especificações de classe. Dependendo de sua aplicação, podemos identificar diferentes arranjos de geração, distribuição e consumo de energia no sistema de propulsão do empurrador. Em sua maioria, identificam-se dois arranjos predominantes no corredor norte de navegação, destinados ao transporte de grãos: o arranjo convencional e o diesel-elétrico ([PEREIRA; SOUZA, 2021](#)).

O sistema de propulsão é caracterizado por um conjunto de mecanismos e técnicas que configuram e geram a força de deslocamento em relação à posição inicial da embarcação. Esse processo pode ser compreendido a partir de três momentos principais: a geração de energia, o mecanismo de transferência e o mecanismo de conversão de movimento ([HEYWOOD, 1988](#)).

A partir dos anos 1990, sistemas que combinam propulsão e direção em um único conjunto ganharam notoriedade no campo da propulsão marítima. Os sistemas de propulsores azimutais garantem ao navio empurrador uma excelente capacidade de manobrabilidade e elevado grau de posicionamento dinâmico, motivo pelo qual este modelo recebe destaque ([BALLOU; GILLMER, 2019](#)).

Além dos arranjos convencionais e diesel-elétricos, estudos recentes demonstram a tendência de adoção de tecnologias híbridas no setor naval, que buscam conciliar a redução de custos operacionais com a diminuição de impactos ambientais. Esse tipo de solução, que integra motores a combustão com sistemas elétricos de armazenamento de energia, já vem sendo testado em embarcações de médio porte e apresenta potencial de aplicação em empurradores fluviais ([WANG; LI, 2020](#)).

A introdução de soluções híbridas, além de reduzir os custos e emissões, complementa os avanços obtidos com os propulsores azimutais, uma vez que ambos ampliam a

eficiência operacional dos empurradores. Enquanto os azimutais oferecem maior capacidade de manobra em trechos críticos, os sistemas híbridos contribuem para a otimização energética durante longas viagens, resultando em operações mais seguras e sustentáveis (PARK; CHEN, 2021).

Outro fator relevante no desempenho dos empurradores é a adoção de sistemas de automação e monitoramento em tempo real. Tais recursos permitem o acompanhamento do consumo de combustível, da performance do motor e das condições de navegação, auxiliando a tomada de decisões estratégicas por parte da tripulação e da empresa operadora (KUMAR; VERMA, 2021).

A integração entre automação embarcada e práticas sustentáveis tem se mostrado um caminho estratégico para o transporte fluvial moderno. Sistemas inteligentes de monitoramento permitem identificar desperdícios, prever falhas e reduzir o impacto ambiental, estabelecendo uma relação direta entre tecnologia e preservação dos recursos naturais da região amazônica (ALMEIDA; COSTA, 2022).

Ademais, o futuro do transporte hidroviário na Amazônia deve considerar a sustentabilidade como eixo central. Investimentos em combustíveis alternativos, como o gás natural liquefeito (GNL) e o biodiesel, bem como em tecnologias de eficiência energética, são apontados como caminhos promissores para alinhar o crescimento logístico da região às metas ambientais globais (SILVA; MARTINS, 2022).

O fluxo de produção das empresas de logística do modal hidroviário, destinadas ao transporte de grãos, é caracterizado em quatro momentos primordiais: embarque, transporte, armazenamento e exportação do produto. Em todas essas etapas é preciso que a empresa atue com plena eficiência para que o fluxo ocorra sem interrupções. Os empurradores desempenham papel essencial nesse processo, uma vez que precisam garantir agilidade, eficiência, capacidade e baixo custo operacional nas manobras (TACLA, 2003; FALCÃO; MOURA, 2020).

Dentro dessa logística, cada empurrador da frota é definido para atuar com melhor desempenho em cada uma das etapas, possuindo características construtivas específicas para tal, desde a potência até o consumo de combustível. Os empurradores de apoio portuário, como o nome sugere, são destinados às movimentações nos terminais. Para entender de forma clara o papel dos empurradores nessa cadeia, é necessário analisar as etapas do processo logístico (FERNANDES; CARVALHO, 2022).

Empresas de logística hidroviária, como a HBSA, são responsáveis pelo transporte de grãos de um ponto inicial até o destino final. O ponto inicial da cadeia dessa empresa está localizado em Miritituba-PA, onde o grão é recebido por caminhões, descarregado por tombadores, transportado por correias e armazenado em silos. Essa empresa possui capacidade de recebimento diário de até 7.000 toneladas, sendo que o tempo de armazenagem

do produto não deve ultrapassar 41 dias.

A partir desse ponto, a carga passa a ser de responsabilidade da empresa logística, que realiza o envio para o terminal de exportação por meio de correias transportadoras, direcionando os grãos para as barcaças. É nesse momento que o empurrador de apoio portuário atua, movimentando as barcaças entre as boias de amarração, pontos de carregamento e a formação do comboio. O empurrador coleta a barcaça vazia, encaminha para o carregamento e, após a operação, direciona a barcaça carregada para a composição do comboio, onde outro empurrador — o troncal — aguarda para iniciar a viagem (SOUZA; MENEZES, 2021).

O empurrador troncal, ou embarcação de viagem, inicia o trajeto com destino ao ponto de exportação em Barcarena-PA. No terminal portuário, o comboio é novamente atracado às boias, onde embarcações de apoio auxiliam no desembarque da carga, encaminhando as barcaças para os píeres. Nesse ponto, os grãos são retirados e armazenados, sendo posteriormente direcionados por correias transportadoras aos navios graneleiros responsáveis pela exportação (BRITO; CASTRO, 2019).

No estado do Pará, principalmente entre o trajeto Itaituba-PA e Barcarena-PA, existem especificidades hidrológicas que afetam a navegação interior, como canais estreitos, a exemplo do Estreito de Breves e do Estreito de Boiuçú. Essas áreas são classificadas pelos órgãos fiscalizadores como de risco, devido à baixa visibilidade, margens reduzidas e restrições de manobra. Por determinação das normas locais, nessas passagens é obrigatória a utilização de embarcações batedoras, que seguem à frente do comboio informando e alertando a passagem. Nesses trechos, a viagem pode durar até 12 horas, com restrição de navegação noturna, o que exige que os empurradores estejam em plenas condições operacionais para evitar falhas (BRASIL. CONGRESSO NACIONAL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. CENTRO DE ESTUDOS E DEBATES ESTRATÉGICOS; CONSULTORIA LEGISLATIVA, 2016).

Portanto, devido às condições operacionais da navegação fluvial no corredor norte, é de suma importância que o sistema de propulsão dos empurradores — tanto de apoio portuário quanto troncais — mantenha total funcionalidade, assegurando a continuidade da cadeia logística, a eficiência operacional e a segurança das embarcações. Além disso, a confiabilidade desses sistemas representa fator estratégico para minimizar atrasos no transporte, reduzir custos operacionais e garantir maior previsibilidade no escoamento da produção. Dessa forma, investir em manutenção preventiva, modernização tecnológica e soluções sustentáveis se torna fundamental para atender às crescentes demandas do setor hidroviário amazônico.

5 SISTEMA DE PROPULSÃO

5.1 Diesel - Elétrico

A propulsão diesel-elétrico (DG) é um sistema integrado que combina motores a combustão interna com geradores elétricos, formando o conjunto denominado motor-gerador. Este sistema converte a energia mecânica gerada pelo motor a diesel em energia elétrica, que é posteriormente utilizada para alimentar os motores elétricos dos propulsores da embarcação. Essa configuração oferece vantagens como maior eficiência energética, menor emissão de poluentes e maior flexibilidade operacional (FALASCHI, et al., 2018; HANSEN; KAERENES; FOSSEN, 2001).

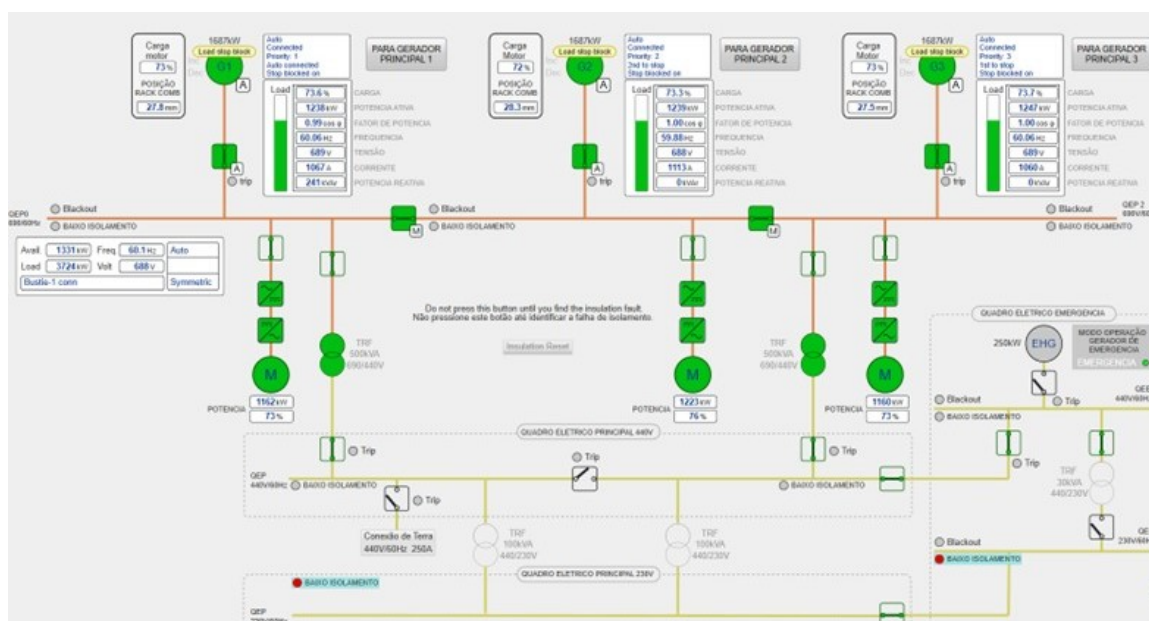
O supervisão é um sistema de automação embarcado que permite o monitoramento e controle dos parâmetros operacionais da embarcação, incluindo geração e distribuição de energia, sistema de propulsão e sistemas de emergência. Ele é instalado no Centro de Controle de Máquinas (CCM) e no passadiço de comando, possibilitando também o acesso remoto para diagnóstico e correção de falhas (FALASCHI, et al., 2018).

Na figura 12, é apresentado o diagrama unifilar de uma embarcação configurada com três conjuntos diesel-elétricos: G1 (Motor Diesel BB), G2 (Motor Diesel CT) e G3 (Motor Diesel BE). A energia gerada é distribuída para o Quadro de Energia Principal (QEP) de 690V, que alimenta os drives dos motores dos propulsores. Além deste, existem outros QEPs de 440V, 220V e 24V, responsáveis por alimentar equipamentos auxiliares, como sistemas de navegação e alarmes (FALASCHI, et al., 2018).

O Quadro Elétrico de Emergência (QEE) é projetado para fornecer energia a sistemas essenciais em situações críticas, garantindo a segurança da navegação. Ele recebe alimentação de fontes redundantes, como geradores diesel de emergência ou baterias de reserva, permitindo que funções vitais continuem operando mesmo diante de falhas na rede elétrica principal. Entre os sistemas alimentados pelo QEE estão alarmes de incêndio, iluminação de emergência, sistemas de comunicação, bombas de combate a incêndio, equipamentos de navegação essenciais e controle do leme e propulsores em baixa potência. A presença do QEE é fundamental para a operação segura da embarcação, garantindo que, mesmo em situações de pane elétrica, os sistemas críticos permaneçam ativos até a normalização do fornecimento de energia ou até a adoção de procedimentos de emergência (FALASCHI, et al., 2018).

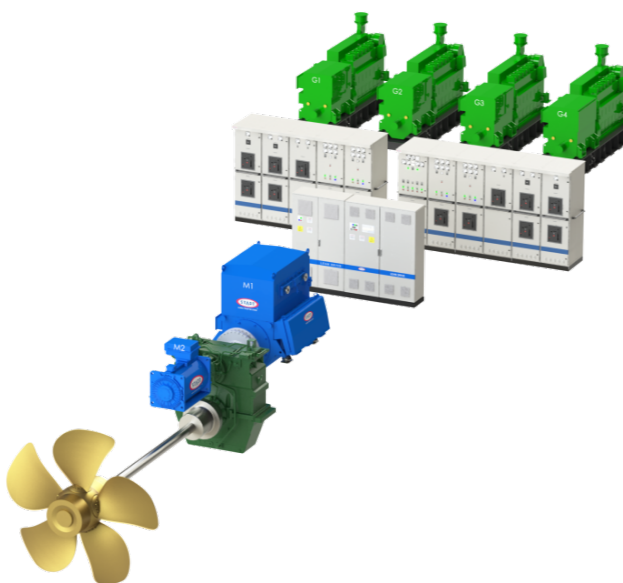
A Figura 13 ilustra o funcionamento do sistema: os motores diesel-geradores alimentam os drives, que acionam os motores dos propulsores, os quais, por sua vez, movimentam as hélices da embarcação (FALASCHI, et al., 2018).

Figura 12 – Diagrama unifilar elétrico



Fonte: (SUPERVISÓRIO HB MAPARA, 2025)

Figura 13 – Configuração diesel-elétrico



Fonte: (AKONGSBERG MARITIME, 2025)

5.2 Diesel - Mecânico

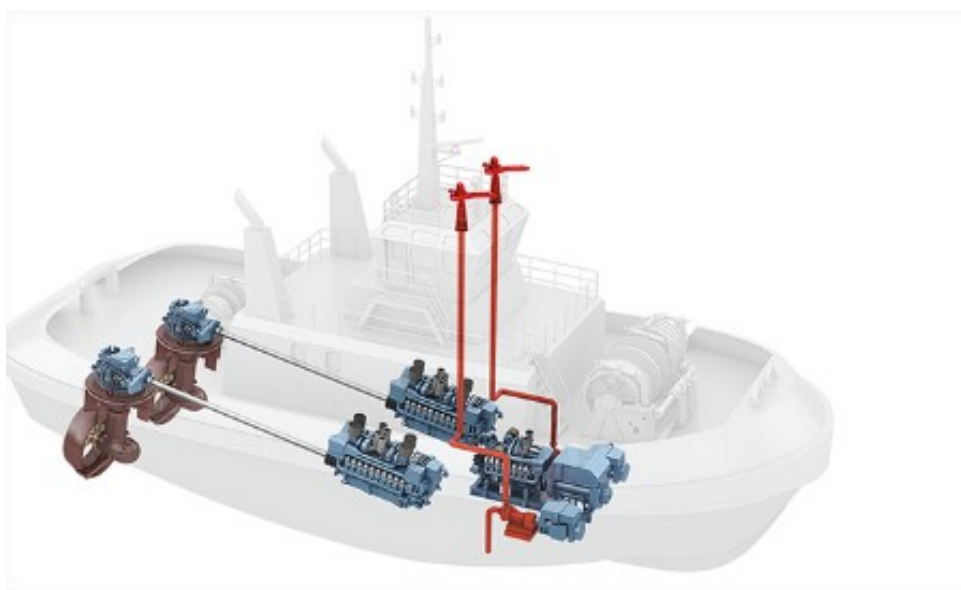
A propulsão diesel-mecânica é caracterizada por ser um sistema robusto, amplamente utilizado em empurradores que demandam grande potência propulsiva. Sua configuração de geração de energia, assim como no diesel-elétrico, advém de motores a diesel de combustão interna. A principal diferença é que, neste sistema, ao invés de um gerador elétrico acoplado ao motor, existe conectado ao eixo rotativo do motor o eixo de transmissão, também conhecido como eixo cardã. (HEYWOOD, 1988; FALASCHI, et al.,

2018).

O eixo cardã é responsável por transmitir o torque gerado pelo motor ao mecanismo propulsor, podendo assumir diferentes configurações, sendo as mais comuns o sistema convencional e o sistema azimutal. No sistema convencional, entre o motor e o eixo existe uma caixa reversora/inversora, e ao final do eixo está a hélice da embarcação. Nesta configuração, a energia mecânica gerada pelo motor é responsável exclusivamente por gerar o empuxo, enquanto o leme determina a direção da movimentação do empurrador (CHRYSSOHOIDES, 2007).

No caso da configuração azimutal, composta por um conjunto de propulsores retráteis, rebatíveis ou fixos, o sistema garante maior manobrabilidade e posicionamento, permitindo a rotação do propulsor em 360° de forma eficiente e ágil. Esse sistema é aplicável tanto à propulsão diesel-elétrico quanto à diesel-mecânica. Sua configuração consiste em um motor acoplado ao sistema de hélices, que está envolto em um tubulão, sendo que, no caso do diesel-mecânico, o motor é alimentado diretamente pelo eixo cardã (CHRYSSOHOIDES, 2007). A figura 14 exibe a configuração diesel-mecânico.

Figura 14 – Configuração diesel-mecânico



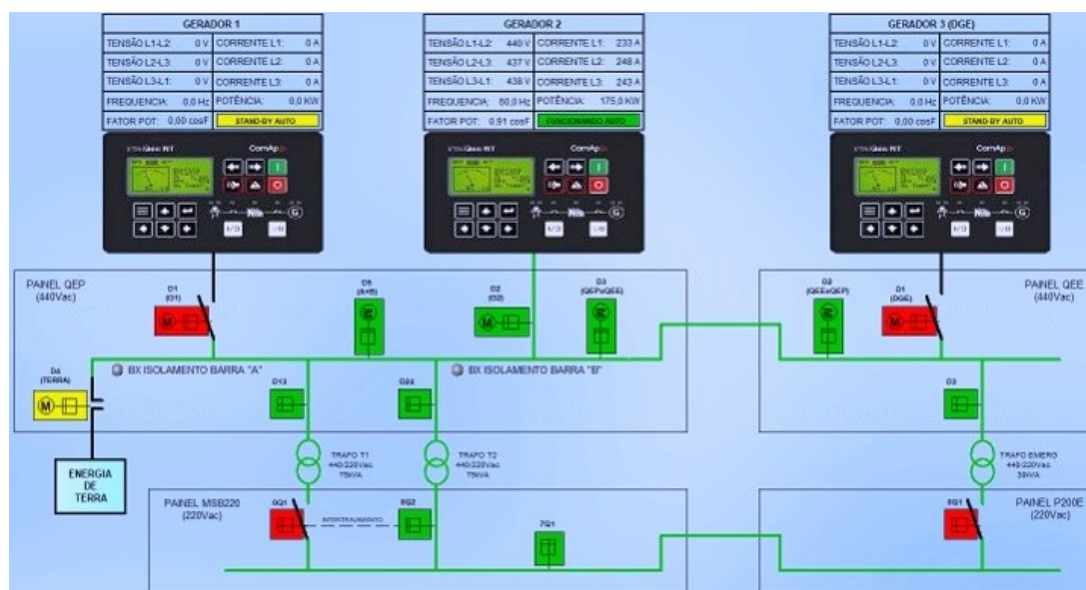
Fonte: (AKONGBERG MARITIME, 2025)

Entre as principais vantagens da propulsão diesel-mecânica destacam-se a alta eficiência mecânica, a robustez do sistema e a capacidade de transmitir grandes potências diretamente aos propulsores, o que é especialmente útil em embarcações que realizam operações de empuxo ou rebocamento intenso. Além disso, a manutenção é relativamente simples em comparação aos sistemas elétricos complexos, e o custo inicial do equipamento tende a ser menor, especialmente em configurações convencionais (TAYLOR, 1985).

Entretanto, esse tipo de propulsão apresenta algumas limitações. O sistema convencional possui menor manobrabilidade em comparação aos propulsores azimutais, exigindo

maior espaço para manobras e dificultando o posicionamento preciso da embarcação. Já os sistemas azimutais, embora proporcionem excelente controle direcional, podem ter custo de instalação mais elevado e complexidade mecânica maior, exigindo manutenção especializada. Apesar disso, a combinação de diesel-mecânico com propulsores azimutais, conforme visto na figura 15 é amplamente utilizada em empurradores modernos, rebocadores portuários e embarcações que demandam alta flexibilidade operacional e eficiência no manuseio de cargas.

Figura 15 – Diagrama unifilar diesel-mecânico



Fonte: (SUPERVISÓRIO HB PIRARARA, 2025)

5.3 Sistema Híbrido

A configuração híbrida é a tecnologia mais recente no cenário de empurradores de cargas. Com o desenvolvimento e aperfeiçoamento de mecanismos que operam com duas ou mais configurações de geração de energia, os avanços possibilitaram a aplicação dessa inovação em diversos meios de transporte, incluindo os empurradores. Em 2023, entrou em operação o primeiro empurrador híbrido do país, destinado à navegação em águas amazônicas. O HB poraquê, nome dado pela empresa Hidrovias do Brasil em referência ao peixe elétrico, tem como princípio de funcionamento um grupo de baterias de íon-lítio que atuam de forma conjunta com grupos geradores (HIDROVIAS DO BRASIL S.A., 2023).

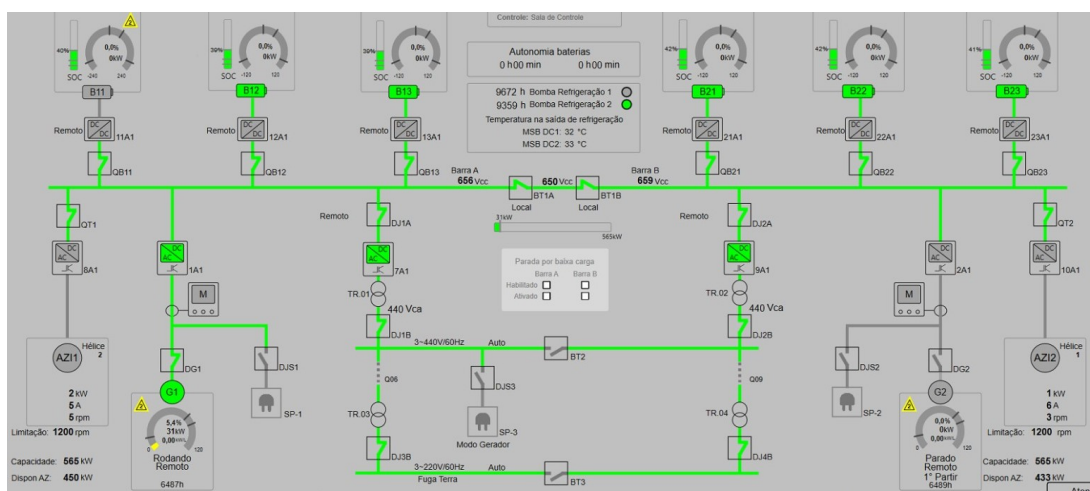
A adoção de sistemas híbridos em empurradores traz vantagens significativas, como a redução do consumo de combustível e a diminuição das emissões de gases poluentes, contribuindo para operações mais sustentáveis. Além disso, a flexibilidade na geração de energia permite otimizar o desempenho em diferentes condições de navegação, tornando a operação mais eficiente e econômica em trechos de baixa ou alta demanda energética. O uso integrado de baterias e diesel geradores (DGs) possibilita operar em modos totalmente

elétrico, parcialmente elétrico ou convencional, ajustando instantaneamente a fonte de energia conforme a carga exigida. Essa configuração também reduz o desgaste dos motores, aumenta a confiabilidade do sistema e diminui o impacto ambiental, especialmente em regiões sensíveis, como rios amazônicos, onde a redução de emissões e ruído contribui para a preservação do ecossistema e do bem-estar das comunidades ribeirinhas. (EXAME, 2022).

Outro benefício importante é a redução de ruído e vibração, características que impactam diretamente no conforto da tripulação e na preservação do ecossistema aquático. A integração entre baterias e geradores possibilita operar parcialmente em modo elétrico, especialmente em áreas sensíveis ambientalmente, como trechos de rios próximos a comunidades ribeirinhas e reservas naturais. Essa operação elétrica reduz significativamente a emissão de gases poluentes e partículas, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais típicos da navegação convencional. Além disso, a tecnologia híbrida permite otimizar o desempenho do motor durante manobras, resultando em maior eficiência energética e menor desgaste dos equipamentos, prolongando sua vida útil e reduzindo custos de manutenção. Dessa forma, o HB Poraquê não apenas atende às exigências regulatórias de sustentabilidade, mas também demonstra o potencial de empurradores híbridos como uma solução inovadora e responsável para o transporte fluvial na Amazônia (PORTAL BENEWS, 2022).

A figura 16 ilustra o diagrama unifilar do sistema Híbrido Azimutal. A Figura 16 apresenta o diagrama unifilar do sistema híbrido azimutal. A alimentação dos motores do sistema azimutal (AZ1) pode ser realizada tanto pelos seis blocos de bancos de baterias quanto pelo conjunto de diesel geradores (DGs), que operam de forma complementar.

Figura 16 – Configuração híbrida



Fonte: (SUPERVISÓRIO HB ENGUIA, 2025)

Esse arranjo permite que o sistema funcione em modos totalmente elétrico, parcialmente elétrico ou convencional, garantindo maior flexibilidade operacional. Além disso, a

integração entre baterias e DGs contribui para a otimização do consumo de combustível, redução de emissões de gases poluentes, diminuição de ruído e vibração, e aumento da confiabilidade e durabilidade dos equipamentos, especialmente durante manobras e operações contínuas em ambientes sensíveis.

5.4 Análise Comparativa dos Sistemas de Propulsão

A escolha entre os sistemas de propulsão diesel-mecânico, diesel-elétrico e híbrido deve considerar as demandas operacionais, os custos e as condições logísticas da cadeia de produção. Cada configuração apresenta vantagens e limitações que influenciam diretamente o desempenho dos empurradores no Corredor Norte de Navegação.

O sistema diesel-mecânico caracteriza-se pela robustez e simplicidade dos componentes construtivos, o que facilita reparos e reduz a necessidade de mão de obra altamente especializada. Sua manutenção tende a ser mais frequente, porém menos complexa, podendo ser executada em locais de difícil acesso. Por outro lado, esse sistema possui limitações no controle de rotação e na injeção de combustível, resultando em menor eficiência energética e maior consumo de combustível quando comparado a sistemas mais modernos.

O sistema diesel-elétrico, por sua vez, apresenta um nível mais elevado de automação e controle. O uso de equipamentos eletrônicos permite ajustes dinâmicos dos parâmetros de operação, otimizando o consumo de combustível e proporcionando maior flexibilidade na distribuição de potência entre os sistemas de bordo. A menor incidência de desgastes mecânicos reduz o número de intervenções de manutenção corretiva; no entanto, falhas em seus componentes elétricos e eletrônicos geralmente requerem técnicos especializados, o que pode dificultar o suporte em regiões remotas.

Já o sistema híbrido combina características de ambos os arranjos anteriores, integrando motores a combustão com bancos de baterias ou outras fontes elétricas de armazenamento. Essa configuração permite operar em modo totalmente elétrico, parcialmente elétrico ou convencional, ajustando instantaneamente a fonte de energia conforme a demanda. Além de reduzir o consumo de combustível e as emissões atmosféricas, o sistema híbrido diminui ruídos e vibrações, aumenta a confiabilidade dos equipamentos e prolonga sua vida útil, constituindo uma alternativa inovadora e ambientalmente mais sustentável para o transporte fluvial amazônico.

De forma geral, enquanto o diesel-mecânico oferece simplicidade, menor custo inicial e manutenção facilitada, o diesel-elétrico destaca-se pela eficiência e controle preciso de potência. O modelo híbrido surge como solução intermediária, unindo robustez dos motores a combustão às vantagens do controle elétrico e da redução de impactos ambientais, sendo promissor para operações sensíveis e para o futuro da navegação interior.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho abordou os diferentes tipos de empurradores que operam no Corredor Norte do Brasil, evidenciando a importância estratégica desse modal de transporte fluvial para a logística nacional. Tal corredor constitui uma via essencial para o escoamento da produção agrícola, especialmente de grãos, consolidando-se como um elo imprescindível para a integração entre os centros produtores e os portos de exportação. Assim, compreender as especificidades técnicas dos empurradores que nele trafegam torna-se fundamental para avaliar a eficiência do sistema logístico. A análise empreendida permitiu constatar que os empurradores com sistemas de propulsão a diesel-elétrico apresentam-se como uma solução tecnológica avançada, que incorpora ganhos em eficiência energética, maior estabilidade operacional e adequação a contextos de elevada complexidade. Essas características revelam-se de grande relevância em cenários marcados por variações climáticas intensas, oscilações no nível dos rios e rotas de navegação mais longas, nas quais o desempenho e a confiabilidade constituem fatores determinantes para o êxito da operação.

De forma complementar, os empurradores a combustão, por sua vez, demonstram elevada robustez estrutural, simplicidade na manutenção e maior acessibilidade em termos de disponibilidade tecnológica. Esses atributos fazem com que desempenhem papel essencial em situações que exigem respostas rápidas, flexibilidade no uso e maior autonomia em regiões que ainda apresentam limitações na infraestrutura de apoio técnico. Dessa maneira, esses empurradores continuam representando uma alternativa eficiente e amplamente empregada, sobretudo em áreas que demandam menor complexidade operacional.

Nesse contexto de análise tecnológica, cabe destacar ainda o papel emergente dos empurradores dotados de sistemas híbridos. Essa configuração, ao reunir os benefícios de ambas as tecnologias, apresenta-se como uma solução inovadora, capaz de aliar a robustez e a simplicidade operacional dos motores a combustão à eficiência energética e ao desempenho aprimorado dos sistemas elétricos. Além disso, o modelo híbrido contribui para a redução das emissões atmosféricas e para uma utilização mais racional do combustível, aspectos que se tornam cada vez mais relevantes em um cenário global de crescente preocupação ambiental e de busca por sustentabilidade no setor de transportes.

Essa versatilidade amplia a resiliência do transporte fluvial, consolidando o sistema híbrido como uma alternativa de grande relevância para o futuro da navegação interior no país.

Ao se considerar a coexistência dessas três tipologias – diesel - mecânico, diesel-elétrico e híbrido –, torna-se evidente que a diversidade não deve ser interpretada em

termos de hierarquia ou superioridade tecnológica. Pelo contrário, constitui elemento indispensável para a resiliência do transporte hidroviário, permitindo maior adaptabilidade às condições variáveis da região norte do Brasil. Essa multiplicidade tecnológica garante segurança e eficiência frente a fatores externos, como instabilidades climáticas, regimes pluviométricos intensos, variações no calado e até mesmo a ocorrência de sismos em áreas estratégicas. Além disso, fortalece a capacidade de resposta do sistema logístico a imprevistos, reduzindo vulnerabilidades e assegurando a continuidade das operações.

Portanto, conclui-se que tanto os empurradores diesel mecânico, quanto os a diesel-elétrico e os híbridos exercem papéis complementares e igualmente imprescindíveis para o funcionamento da logística de transporte fluvial no corredor norte. Mais do que simples alternativas de geração de propulsão, essas tecnologias representam soluções estratégicas que contribuem diretamente para a consolidação do agronegócio, setor que figura como um dos principais motores da economia brasileira. O escoamento eficiente de grãos, viabilizado por essa diversidade de embarcações, não apenas impulsiona o giro econômico interno, mas também reforça a posição do Brasil no comércio internacional, assegurando competitividade e relevância no cenário global.

Em síntese, a coexistência de diferentes sistemas de geração de propulsão nos empurradores que trafegam no corredor norte reflete a necessidade de conjugar inovação, praticidade e estratégia em prol de um transporte fluvial mais eficiente e resiliente. Essa diversidade tecnológica consolida-se, assim, como um dos principais pilares para a manutenção da fluidez logística, o fortalecimento do agronegócio e a sustentação da economia nacional.

REFERÊNCIAS

- AKONGSBERG MARITIME. *Configuração diesel elétrica - DC Hybrid Solution*. 2025. Imagem disponível no site oficial da empresa. Fonte: AKONGSBERG MARITIME, 2025. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- ALMEIDA, J.; COSTA, F. *Tecnologias Sustentáveis no Transporte Hidroviário da Amazônia*. Belém: Editora UFPA, 2022. Citado na página 30.
- AMPORT. *Arco Norte poderá concentrar até 50% da exportação de soja e milho até 2030*. 2025. Reportagem no site Tecnológica. Citado na página 14.
- ANCHIETA PEÇAS. *Bloco do Motor Cummins ISB 6 Cilindros Original 2S0103011Q*. 2025. Disponível em: <<https://www.anchietapecas.com.br/bloco-motor-isb-6-cilindros-2s0103011q-anc-p1013290>>. Acesso em: 06 set. 2025. Citado na página 23.
- BALLOU, J.; GILLMER, T. *Introduction to Naval Architecture and Marine Engineering*. Berlin: Springer, 2019. Citado na página 29.
- BALLOU, R. H. *Logística empresarial: transporte, administração de materiais e distribuição física*. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2006. Citado na página 13.
- BERTRAM, V. *Practical ship hydrodynamics*. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 18.
- BRASIL. CONGRESSO NACIONAL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. CENTRO DE ESTUDOS E DEBATES ESTRATÉGICOS; CONSULTORIA LEGISLATIVA. *Arco Norte: o desafio logístico*. Brasília: Edições Câmara, 2016. 392 p. (Estudos Estratégicos, 6). Citado na página 31.
- BRITO, C.; CASTRO, V. *Logística Portuária e Exportação de Commodities*. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2019. Citado na página 31.
- BRUNETTI, F. *Motores de Combustão Interna*. [S.l.]: São Paulo: Blucher, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- CHRYSSOHOIDES, G. *Marine Propulsion Systems: Diesel Mechanical and Azimuth Thrusters*. London: Springer, 2007. Citado na página 34.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). *Boletim Logístico*. Brasília, 2024. Acesso em: 06 set. 2025. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/logistica/boletim-logistico>>. Citado na página 13.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). *Comparação entre modalidades de transporte por volume*. 2023. Infográfico publicado na Revista CNT. Fonte: Revista CNT (2023). Citado na página 14.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE (DNIT). *Logística de grãos no Brasil*. 2024. Infográfico institucional. Fonte: Elaboração DNIT. Citado na página 13.

DREAMSTIME. *Diferentes arranjos de cilindros*. 2010. Imagem adaptada. Disponível em: <<https://www.dreamstime.com>>. Acesso em: 06 set. 2025. Citado na página 23.

EXAME. *Hidrovias do Brasil terá primeiro empurrador elétrico do mundo em 2022*. 2022. <<https://exame.com/bussola/hidrovias-do-brasil-tera-primeiro-empurrador-eletrico-do-mundo-em-2022/>>. Acesso em: 08 set. 2025. Citado na página 36.

FALASCHI, et al. *O Esquema de motor a combustão interna de pistão*. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) — Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2018. Citado 7 vezes nas páginas 23, 24, 25, 27, 32, 33 e 34.

FALCÃO, P.; MOURA, D. *Logística Fluvial e Transporte de Grãos na Amazônia*. Manaus: Editora Senai, 2020. Citado na página 30.

FERNANDES, G.; CARVALHO, M. *Gestão Operacional de Frotas Fluviais*. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2022. Citado na página 30.

FERREIRA, A. B. d. H. *História das embarcações: dos barcos a remo à navegação moderna*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2010. Citado na página 18.

FERREIRA, M.; REIS, A. *Direito Marítimo e Normas de Navegação*. São Paulo: Editora Atlas, 2020. Citado na página 29.

FREEPIK. *Pistão e biela*. 2023. Disponível em: <<https://www.freepik.com>>. Acesso em: 06 set. 2025. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

GARCIA, P.; SOUZA, R. *Motores a vapor e a revolução industrial: fundamentos e aplicações*. São Paulo: Blucher, 2017. Citado na página 18.

GARCIA, R.F. Ciclo do motor quatro tempos. *Revista Cultivar*, 2021. Acesso em: 06 set. 2025. Disponível em: <<https://revistacultivar.com.br/noticias/como-funciona-o-motor-a-diesel-e-suas-vantagens>>. Citado na página 26.

HANSEN, J. F.; KAERENES, A.; FOSSEN, T. I. Mathematical modelling of diesel-electric propulsion systems for marine vessels. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, v. 7, n. 1, p. 1–33, 2001. Acesso em: 8 set. 2025. Disponível em: <<https://www.dieselduck.info/machine/02%20propulsion/2001%20DE%20Propulsion%20theory.pdf>>. Citado na página 32.

HEYWOOD, J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 1988. Citado 9 vezes nas páginas 21, 22, 24, 25, 27, 28, 29, 33 e 34.

HIDROVIAS DO BRASIL S.A. *Comboio de barcaças navegando no rio – Hidrovias do Brasil*. 2023. Imagem institucional online. Acesso em: 06 set. 2025. Disponível em: <<https://cdn-pen.nuneshost.com/images/230216-comboio-barcaças-hidrovi-as-do-brasil.jpg>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 35.

HIRSCH, A. *A Evolução Histórica do Motor a Vapor*. 2019. Disponível em: <<https://paginapessoal.utfpr.edu.br/hirsch/fontes-alternativas-de-energia/02%20-%20Maquina%20a%20Vapor%20a%20pistao.pdf>>. Citado na página 20.

INFOESCOLA. *Motor a Vapor*. 2025. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/termodinamica/motor-a-vapor/>>. Citado na página 20.

- KUMAR, A.; VERMA, P. Real-time monitoring and automation in river navigation. *Marine Systems and Ocean Technology*, v. 16, n. 2, p. 145–160, 2021. Citado na página 30.
- LANDES, D. S. *A riqueza e a pobreza das nações*. Rio de Janeiro: Campus, 1998. Citado na página 19.
- LAURAANNEART. *Barco a vapor navegando no rio*. 2024. Imagem digital. Acesso em: 06 set. 2025. Disponível em: <<https://pixabay.com/pt/photos/barco-a-vapor-barco-no-rio-vapor-9013697/>>. Citado na página 19.
- LIMA, E. d. O. *Motores de Combustão Interna*. São Paulo: Érica, 2015. Citado na página 21.
- MARINHA DO BRASIL. *História das Máquinas Térmicas e o Desenvolvimento das Leis da Termodinâmica*. 2015. Disponível em: <<https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/599896/1/Hist%C3%B3ria%20das%20m%C3%A1quinas%20t%C3%A9rmicas%20e%20o%20desenvolvimento%20das%20leis%20da%20Termodin%C3%A2mica.pdf>>. Citado na página 20.
- MARINHA DO BRASIL. *Normas da Autoridade Marítima – NORMAM*. Brasília, 2021. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dpc/normam>>. Acesso em: 08 set. 2025. Citado na página 29.
- MARTINS, J. *Motores de Combustão Interna*. Lisboa: Quântica Editora, 2022. ISBN 978-989-8927-84-2. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.
- MOKYR, J. *The lever of riches: technological creativity and economic progress*. Oxford: Oxford University Press, 1990. Citado na página 19.
- MOTT, L. *Naval architecture for non-naval architects*. New York: Springer, 2013. Citado na página 15.
- MÍNGUEZ S.A. *Principais componentes de um motor*. 2021. Imagem digital. Acesso em: 06 set. 2025. Disponível em: <<https://minguez.es/wp-content/uploads/2021/04/principales-componentes-de-un-motor-1024x723.png>>. Citado na página 22.
- NATIONAL GEOGRAPHIC. *Embarcação antiga com velas - reconstrução histórica*. 2023. Imagem online. Acesso em: 06 set. 2025. Disponível em: <<https://www.nationalgeographic.com>>. Citado na página 19.
- PAPANIKOLAOU, A. *Ship Design: Methodologies of Preliminary Design*. 2. ed. Cham: Springer, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 18.
- PAPPE, L. *História da navegação e da construção naval no Brasil*. Rio de Janeiro: Editora Capivara, 2001. Citado na página 18.
- PARK, S.; CHEN, Y. Energy optimization in hybrid and azimuthal propulsion systems. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, v. 13, n. 4, p. 505–519, 2021. Citado na página 30.
- PEREIRA, L.; SOUZA, R. *Sistemas de Propulsão Naval: Conceitos e Aplicações*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2021. Citado na página 29.

- PORTAL BENEWS. *TUP do Pará terá primeiro empurrador elétrico de barcas do mundo*. 2022. <<https://portalbenews.com.br/tup-do-para-tera-primeiro-empurrador-eletrico-de-baracas-do-mundo/>>. Acesso em: 08 set. 2025. Citado na página 36.
- PORTAL DE PERIÓDICOS DA MARINHA DO BRASIL. A evolução das formas de propulsão e suas implicações táticas. *Revista Marítima Brasileira*, 2023. Disponível em: <<https://www.portaldeperiodicos.marinha.mil.br/index.php/revistamaritima/article/download/6060/5788/22273>>. Citado na página 20.
- RODRIGUES, P. R. *Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos*. São Paulo: Elsevier, 2007. Citado na página 13.
- SCRIBD. *Máquinas Marítimas / PDF / Motor de Combustão Interna*. 2025. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/400347961/MA-QUINAS-MARITIMAS>>. Citado na página 20.
- SILVA, R.; MARTINS, F. *Energia Limpa e Sustentabilidade no Setor Naval*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2022. Citado na página 30.
- SOUZA, L.; MENEZES, A. *Operação de Empurradores no Transporte Hidroviário de Grãos*. São Paulo: Editora Interciência, 2021. Citado na página 31.
- STOPFORD, M. *Maritime Economics*. 3. ed. London: Routledge, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.
- SUPERVISÓRIO HB ENGUIA. *Diagrama unifilar híbrido*. 2025. Imagem do relatório técnico. Acesso em: 06 set. 2025. Citado na página 36.
- SUPERVISÓRIO HB MAPARA. *Diagrama unifilar diesel elétrico*. 2025. Imagem do relatório técnico. Acesso em: 06 set. 2025. Citado na página 33.
- SUPERVISÓRIO HB PIRARARA. *Diagrama unifilar diesel mecânico*. 2025. Imagem do relatório técnico. Acesso em: 06 set. 2025. Citado na página 35.
- TACLA, D. *Estudo de transporte colaborativo de cargas de grande volume, com aplicação em caso de soja e fertilizantes*. Tese (Tese (Doutorado)) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 30.
- TAYLOR, C. F. *The Internal-Combustion Engine in Theory and Practice*. 2. ed.. ed. Cambridge: MIT Press, 1985. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 34.
- VARELLA, C. A. A.; SANTOS, G. d. S. *Noções básicas de motores diesel*. 1. ed. Seropédica, RJ: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, 2010. Citado na página 21.
- WANG, H.; LI, J. Hybrid propulsion systems in inland navigation: A case study. *Journal of Marine Engineering and Technology*, v. 19, n. 3, p. 210–225, 2020. Citado na página 29.