



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL  
MESTRADO EM ENGENHARIA NAVAL

RODRIGO DOS SANTOS SAAVEDRA

**ESTRATÉGIA PARA SELEÇÃO DE SISTEMA PROPULSIVO: CASO DA ROTA  
MIRITITUBA-VILA DO CONDE**

**BELÉM**

**2023**

**ESTRATÉGIA PARA SELEÇÃO DE SISTEMA PROPULSIVO: CASO DA ROTA  
MIRITITUBA-VILA DO CONDE**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval – PPGENAV, do Instituto de tecnologia – ITEC, da Universidade Federal do Pará – UFPA, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Naval.

Linha de Pesquisa: Transporte aquaviário

Orientador: Prof. D. Sc. Nélio Moura de Figueiredo

Coorientador: Prof. D. Sc. Pedro Igor Dias Lameira

**BELÉM**

**2023**

“É genial festejar o sucesso, mas é mais importante aprender com as lições do fracasso.”

*(Bill Gates)*

## AGRADECIMENTOS

À **Deus**, pela dádiva da vida e por me permitir a realização de tantos sonhos ao decorrer da infinidade dessa vida. Agradeço principalmente pelos erros ao decorrer da minha existência, pois estes me permitiram crescer como ser humano e aprender como uma criança frente à tanta benevolência, por seu amor incondicional, pela sua mão protetora e pela sua voz que me permitiu continuar sempre e não desistir diante dos percalços da vida.

Ao **prof. Nélio Moura de Figueiredo**, pela orientação, paciência e profissionalismo que foram tão necessários durante o caminho. Pelo incentivo que deu em momentos de desestimulação e por diversos conselhos em outros âmbitos da vida.

Ao **prof. Pedro Igor Dias Lameira**, por toda paciência e empenho com que me orientou durante toda a vida acadêmica. Pelas horas de conversa e orientação. Pela amizade oferecida durante todo o processo. Por toda ajuda em amplos sentidos da vida e pela dedicação na arte do ensino. Agradeço por acreditar no meu potencial quando nada tinha a oferecer, até nos momentos de vagarosidade. Você é o grande motivo por eu ter chegado onde cheguei, sem sua ajuda eu não trilharia nem metade do caminho.

Aos amigos **Tainã Filgueiras e Rubenson Santos**, pelo apoio e motivação exemplar que ajudaram este trabalho a se tornar realidade. Pelos momentos de companheirismo e pela amizade construída nos períodos de felicidade e de dificuldade. Sou grato pela nossa amizade. Aos colegas de laboratório, pela disponibilidade em ajudar e pelo encorajamento em momentos cruciais.

Aos meu pais, **João Maria Saavedra e Alda Cristina Saavedra**, pelos conselhos preciosos ao decorrer da vida. Pelo direcionamento à um caminho que me levou ao sucesso tanto almejado. Pela compreensão nos momentos de ausência e falta de atenção. Obrigado por sempre me desejarem o bem e o melhor pra mim, pelo esforço que fizeram para que eu chegasse até aqui e pelo amor intenso que eu pude usufruir. Pra vocês, eu dedico meu amor incondicional.

## RESUMO

No campo das análises complexas, como as que envolvem perspectivas de unidades incomparáveis dentro de um mesmo estudo, é inerente a necessidade de métodos que possam medir o desempenho às decisões sem perder informações e diante de diferentes fatores. Para medir os ganhos em termos de eficiência de transporte, a pesquisa apresenta um novo método integrado de tomada de decisão para comparar desempenhos de sistemas de propulsão alternativos para comboios fluviais localizados na rota Miritituba-Vila do Conde. O trabalho também é motivado pelo aumento da produção e das exportações na região amazônica, tomadas por vias navegáveis interiores, que podem causar problemas futuros decorrentes do aumento significativo da navegação na região. Depois de analisar diversos fatores que influenciam o desempenho da região, foi feita uma avaliação pelas perspectivas de segurança, custos e eficiência energética, destacando também o uso abordagens modernas para os métodos MCDM utilizados na pesquisa, abordando os resultados e as vantagens de cada método. Para verificar a confiabilidade do método proposto, foi utilizada uma análise de sensibilidade pelo método ELECTRE. Ambos os resultados demonstraram que a utilização da propulsão diesel-elétrica com propulsores azimutais na rota estudada aumentaria a eficiência energética da navegação e a segurança em comparação às demais alternativas avaliadas, sendo, portanto, a alternativa com maior desempenho da análise. A comparação de métodos e resultados mostrou a veracidade dos resultados obtidos em um processo de análise, mesmo sob perspectivas incomparáveis. A principal contribuição desta pesquisa é a integração de diferentes perspectivas sem a perda de informações, conceituando diferenças entre as alternativas apresentadas. Acredita-se que o processo adotado contribuirá veementemente para uma melhor análise de sistemas específicos sob múltiplas perspectivas, proporcionando uma tomada de decisão simples, mas confiável.

**Palavras-chave:** Sistemas Propulsivos. Hidrovia restrita. MCDM. Eficiência energética. Custos Segurança

## ABSTRACT

In the field of complex analyses, such as those involving perspectives of unparalleled units within the same study, the need for methods that can measure performance to decisions without losing information and in the face of different factors is inherent. To measure gains in terms of transport efficiency, the paper presents a new integrated decision-making method to compare performances of alternative propulsion systems for river trains located on the Miritituba-Vila do Conde route. The paper is also motivated as a result of the increase in production and exports in the Amazon region, taken by restricted waterways, which should cause problems resulting from large-scale navigation in the region. After analyzing several factors that influence the region's performance, an assessment was established given the perspectives of security, costs and energy efficiency. Also, this work highlights modern approaches to the MCDM methods used in the research, addressing the results and advantages of each method. To investigate the reliability of the proposed method, a sensitivity analysis using the ELECTRE method was used. Both results demonstrated that the use of diesel-electric propulsion with azimuth thrusters in the studied route would increase the energy efficiency of navigation and safety in comparison to the other evaluated alternatives, therefore, being the alternative with the highest performance of the analysis. The comparison of methods and results showed the veracity of the results obtained in an analysis process, even using incomparable perspectives. The main contribution of this paper is the integration of different perspectives without the loss of information, conceptualizing differences between the alternatives presented. It is believed that the process adopted will contribute vehemently to a better analysis of specific systems from multiple perspectives, providing a simple but reliable decision making.

**Keywords:** Propulsive Systems. Restricted Waterway. MCDM. Energy Efficiency. Costs. Safety

## LISTAS DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Fluxograma do trabalho .....	22
<b>Figura 2</b> - Produtividade do agronegócio brasileiro .....	24
<b>Figura 3</b> - Principais compradores da produção agrícola brasileira .....	25
<b>Figura 4</b> - Projeções para produção e área plantada de grãos.....	26
<b>Figura 5</b> - Produção de soja em grão por estado (2018/2019).....	28
<b>Figura 6</b> – Produção, Consumo e Exportação de Soja em Grão (mil toneladas) .....	29
<b>Figura 7</b> - Distribuição modal da matriz brasileira de transporte de cargas (Bilhões de TKU's e porcentagem) .....	32
<b>Figura 8</b> - Regiões hidrográficas do Brasil.....	33
<b>Figura 9</b> - Hélice de passo fixo.....	41
<b>Figura 10</b> - Hélice de passo controlável .....	44
<b>Figura 11</b> - Propulsão azimutal .....	45
<b>Figura 12</b> - Instalação Diesel Convencional.....	48
<b>Figura 13</b> - Instalação Diesel-Elétrica .....	51
<b>Figura 14</b> - Fluxograma da metodologia utilizada .....	60
<b>Figura 15</b> - Níveis da estrutura hierárquica do AHP .....	63
<b>Figura 16</b> - Exemplo de matriz de decisão .....	65
<b>Figura 17</b> - Áreas de Influência - ETC's Miritituba.....	69
<b>Figura 18</b> – Rota de Estudo Miritituba - Vila do Conde .....	70
<b>Figura 19</b> – Representação do Comboio-tipo.....	71
<b>Figura 20</b> – Estruturação do Modelo Hierárquico.....	73
<b>Figura 21</b> – Sistema de Coordenadas de Velocidade e Direção.....	76
<b>Figura 22</b> – Ilustração de Sistema de Motor a Diesel.....	77
<b>Figura 23</b> – Ilustração de Sistema de Motor a Diesel-Elétrico.....	79
<b>Figura 24</b> – Mapa de Peso dos Critérios Seleccionados.....	81
<b>Figura 25</b> – Fluxos Líquidos Totais .....	87

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Projeções para a produção e área plantada de grãos.....	26
<b>Tabela 2</b> - Projeções de exportação de regiões selecionadas de 2017 a 2028 .....	30
<b>Tabela 3</b> - Principais mercadorias movimentadas na navegação interior - 1º Trimestre/2019	34
<b>Tabela 4</b> - Principais instalações portuárias na movimentação em navegação interior.....	35
<b>Tabela 5</b> - Características gerais das hidrovias do estudo .....	39
<b>Tabela 6</b> - Importantes características dos tipos de hélice.....	47
<b>Tabela 7</b> - Métodos MCDM, suas aplicações, forças e fraquezas .....	54
<b>Tabela 8</b> - Escala de comparação AHP .....	64
<b>Tabela 9</b> - Matriz de comparação em pares para o nível dos critérios .....	64
<b>Tabela 10</b> - Matriz de comparação em pares para o nível das alternativas .....	64
<b>Tabela 11</b> – Características do Comboio-tipo .....	71
<b>Tabela 12</b> - Scores de fator de influência para seleção propulsiva na navegação fluvial na Amazônia.....	82
<b>Tabela 13</b> - Matriz de comparação de pares para fatores .....	82
<b>Tabela 14</b> - Matriz de Comparação Paritária para Custos .....	83
<b>Tabela 15</b> - Matriz de Comparação Paritária para Custos Operacionais .....	84
<b>Tabela 16</b> - Matriz de Comparação Paritária para Custos de Manutenção.....	85
<b>Tabela 17</b> - Matriz de Comparação Paritária para Custos de Aquisição .....	85
<b>Tabela 18</b> - Matriz de Comparação Paritária para Segurança .....	86
<b>Tabela 19</b> - Matriz de Comparação Paritária para Eficiência Energética.....	86
<b>Tabela 20</b> – Pesos Finais .....	87
<b>Tabela 21</b> – Classificação final e fluxos líquidos totais por AHP-PROMETHEE.....	88
<b>Tabela 22</b> – ELECTRE ranking.....	88
<b>Tabela 23</b> – ELECTRE dominance preference .....	88

## LISTA DE SIGLAS

AHP	Apoio Multicritério a Decisão
AHIMOR	Administração das Hidrovias da Amazônia Ocidental
AHIMOC	Administração das Hidrovias da Amazônia Ocidental
AMD	Apoio Multicritério a Decisão
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
BCC	Banker, Charnes e Cooper
CCR	Charnes, Cooper e Rhodes
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DMU	Decision Making Unit
DEA	Development Envelopment Analysis
EBN	Empresa Brasileira de Navegação
ELECTRE	Elimination and Choice Expressing Reality
ETC	Estação de Transbordo de Carga
MCDA	Multicriteria Decision Analysis
MT	Ministério dos Transportes
PIB	Produto Interno Bruto
PNLP	Plano Nacional de Logística
PPL	Problema De Programação Linear
PROMETHEE	Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations
SNA	Sociedade Nacional de Agricultura
SNP/MTPA	Secretaria Nacional dos Portos do Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
1.1.	TRANSPORTE HIDROVIÁRIO.....	14
1.2.	JUSTIFICATIVA.....	17
1.3.	OBJETIVOS.....	19
1.3.1.	Objetivo Geral.....	19
1.3.2.	Objetivos Específicos.....	19
1.4.	HIPÓTESE.....	20
1.5.	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
1.6.	FLUXOGRAMA DO TRABALHO.....	21
2.	SITUAÇÃO DA PRODUÇÃO E EXPORTAÇÃO DA SOJA FRENTE AO MERCADO INTERNACIONAL.....	23
2.1	PRODUÇÃO E EXPORTAÇÃO DO AGRONEGÓCIO BRASILEIRO.....	23
2.2	TRANSPORTE DA PRODUÇÃO DE GRÃOS PELO NORTE DO PAÍS.....	29
3.	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS HIDROVIAS.....	37
3.1	HIDROVIA DO TAPAJÓS-TELES PIRES.....	37
3.2	HIDROVIA DO AMAZONAS.....	37
3.3	CARACTÉRISTICAS GERAIS.....	38
3.4	ROTA FLUVIAL MIRITITUBA-VILA DO CONDE.....	39
4.	ALTERNATIVAS DE SISTEMAS PROPULSIVOS.....	41
4.1	PROPULSÃO COM HÉLICES DE PASSO FIXO.....	41
4.2	PROPULSÃO COM HÉLICES DE PASSO CONTROLÁVEL.....	43
4.3	PROPULSORES COM HÉLICES AZIMUTAIS.....	45
4.4	CARACTERÍSTICAS DOS TIPOS DE HÉLICES NA PROPULSÃO.....	46
4.5	INSTALAÇÃO DIESEL.....	47
4.6	INSTALAÇÃO DIESEL-ELÉTRICA.....	50
5.	METODOLOGIA.....	53
5.1	DESENVOLVIMENTO E ESTRUTURAÇÃO METODOLÓGICA.....	53

5.2	ANALYTIC HIERARCHY PROCESS .....	56
5.3	AVALIAÇÃO, CONCEITO E TIPOS DE QUESTIONÁRIOS.....	62
5.4	APLICAÇÃO DO MÉTODO HÍBRIDO AO ESTUDO DE CASO .....	63
6.	ESTUDO DE CASO .....	69
6.1	ÁREA DE ESTUDO .....	69
6.2	CRITÉRIOS ANALISADOS .....	72
6.2.1	Eficiência energética.....	73
6.2.2	Custos do sistema propulsivo .....	75
6.2.3	Segurança.....	75
6.3	ALTERNATIVAS ANALISADAS .....	77
6.4	SELEÇÃO DO SOFTWARE SUPER DECISIONS EM APOIO AO AHP .....	80
7.	RESULTADOS .....	81
7.1	RESULTADOS DA HIERARQUIZAÇÃO DOS FATORES DE INFLUÊNCIA NA SELEÇÃO DE SISTEMAS PROPULSIVOS.....	81
7.2	RESULTADOS DA QUANTIFICAÇÃO DOS PESOS DOS CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DE SISTEMAS PROPULSIVOS VIA AHP .....	82
7.3	RESULTADOS DAS ALTERNATIVAS À LUZ DOS CRITÉRIOS .....	83
7.4	RESULTADOS DA HIERARQUIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS DE SISTEMAS PROPULSIVOS VIA PROMETHEE .....	87
7.5	RESULTADOS DA PRIORIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS UTILIZANDO O MÉTODO ELECTRE IV .....	88
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	90
9.	REFERÊNCIAS .....	93

## 1. INTRODUÇÃO

O transporte comercial de cargas e passageiros por meio de rios ou canais ao redor do mundo vem sofrendo transformações que refletem diretamente as condições e circunstâncias técnico-econômicas e sociais de cada região em cada momento. Esse modal de transporte proporcionou diversas descobertas territoriais e obtenção de riquezas em tempos remotos. Historicamente, as primeiras terras colonizadas foram encontradas através da navegação ao redor da costa do mediterrâneo, demonstrando a notoriedade da navegação interior em sua obra (SMITH, 1776).

Devido a extensa utilização da navegação, portando-se como principal acesso a regiões interiores e, por vezes, ainda intocadas, a humanidade percebeu diversas vantagens advindas do desenvolvimento por meio de obras a fim de melhorar as condições de navegação. Desta forma, foram construídas as primeiras obras em áreas fluviais, como canais artificiais e barragens com eclusas. Estas obras foram realizadas com a finalidade de amenizar os esforços e minimizar os tempos de deslocamentos de cargas através dos rios.

Apesar de existir uma ampla gama de estudos sobre a utilização de recursos aquaviários, pesca sustentável e políticas acerca do uso dos oceanos; Benediktsson, Waage e Zeta Books (2015) argumentaram que: “As relações contemporâneas entre pessoas e a natureza oceânica tem sido negligenciada dentro do domínio acadêmico”. Não obstante, esse fato é concretizado na área fluvial, acarretando uma irremissível utilização empírica.

Entretanto, o Brasil, que possui grande potencial hídrico, contando com 41,6 mil quilômetros de vias navegáveis (SILVA JUNIOR, 2017), vem desenvolvendo suas hidrovias de maneira tardia se comparado com os países europeus e o Estados Unidos. Esses países utilizam a navegação fluvial significativamente com grande efetividade no transporte de cargas a granel e contêineres.

Na região Norte do país, a utilização de rios navegáveis compreendidos na bacia amazônica conduziu o processo de ocupação da região, cumprindo papel de destaque nas questões econômicas e sociais, inclusive em seus ciclos econômicos. Mesmo com o recente processo de desenvolvimento da região, a navegação interior de passageiros e mista permanece como a principal alternativa de transporte na região (ANTAQ, 2018a).

A malha hidroviária composta por mais de 16 mil quilômetros de rios navegáveis, que está inserida na região norte do Brasil (ARAÚJO et al., 2018), é o principal vínculo entre os grandes centros urbanos ou capitais, municípios interioranos e de comunidades ribeirinhas que se

encontram em regiões mais remotas. Portanto, a utilização do modal de transporte hidroviário é solução fundamental para o desenvolvimento social, logística, manutenção cultural e crescimento econômico da população local. O transporte hidroviário é estabelecido, de maneira regular, como interseção de cidades existentes na região amazônica, a exemplo de Belém, Manaus, Santarém, Macapá, Cametá, o que viabiliza o acesso da população local a bens de consumo e subsistência e serviços básicos (ANTAQ, 2018a).

Por consequência, a navegação fluvial no âmbito amazônico tem sido, de modo incontestável, a principal sustentação de desenvolvimento da economia amazônica, tendo um caráter estratégico amplo para o desenvolvimento social e econômico da região. Nesse contexto, esse tipo de transporte se mostra essencial e estratégico para a região, por ser condição mínima para viabilização de outras atividades estritamente dependentes desse tipo de transporte e por frustrar o estrangulamento do processo produtivo local.

Em relação à perspectiva econômica, o transporte por vias interiores constitui um suporte de toda atividade econômica da região norte, sendo estritamente estratégico pela sua alta eficiência e baixo custo, tornando a região competitiva no mercado interno e interestadual. Quanto à perspectiva social, esse tipo de transporte se torna agente favorecedor do direito social ao transporte de populações ribeirinhas, com custos compatíveis com o ganho dessas populações e mantendo-as com bens e produtos em condições dignas.

Ainda assim, segundo Teixeira et al. (2018), o Brasil não tem seu potencial de transporte hidroviário integralmente explorado, mesmo que grande parte do seu volume de cargas seja transportado via fluvial. Apesar deste fato, os rios brasileiros têm demonstrado um grande potencial em acrescentar à economia nacional, envolvendo conhecimentos científicos e tecnológicos maiores e também preocupações quanto aos impactos ambientais e sociais deste tipo de transporte. Equipamentos e materiais mais adequados para a realização de obras e de operação de embarcações surgem de forma concomitante.

Desta forma, o país se mostra em condições ideais de aumentar a exploração de seu potencial hidroviário, de forma mais racional e segura que grande parte dos países que utilizam a navegação interior. Baseando-se na experiência adquirida pelos países europeus e norte-americanos, é essencial a revisão de alguns conceitos de projetos de hidrovias, buscando uma concepção através da aplicação de tecnologias mais desenvolvidas de projeto e construção de embarcações e vias, o que resultará em ganhos socioeconômicos.

## 1.1. TRANSPORTE HIDROVIÁRIO

A greve dos caminhoneiros, em maio de 2018, culminou em uma quantidade significativa de efeitos sobre o abastecimento do país, desde a distribuição de itens básicos até a de combustíveis. Entre outras coisas, os bloqueios das rodovias brasileiras expuseram a dependência do país do transporte rodoviário. De acordo com Roncolato (2018), as estradas foram opção de aproximadamente 76% das empresas para distribuição e escoamento de bens em 2017. Para diminuir os impactos de desabastecimento interno, outros modais de transportes poderiam ser utilizados mais veemente no Brasil, como o hidroviário.

O transporte hidroviário dispõe de uma grandiosa vocação para o deslocamento de cargas, disponibilidade proporcional à capacidade hidrológica da região e é o modal com menor custo quando comparado aos demais. Entretanto, a má logística e administração desse modal podem influenciar diretamente nos custos finais do processo.

“Ele tem capacidade de transportar grandes quantidades de carga, sejam elas quais forem, sólidas ou líquidas, a granel ou embaladas, como carga geral solta ou unitizadas em pallets e/ou containers, enfim, de maneira como desejado pelos intervenientes.” (KEEDI, 2001)

O transporte aquaviário não é uma forma tão limpa de transporte, considerando o peso de combustível queimado por peso de material transportado. Entretanto, em comparação ao transporte rodoviário que é de cerca de 15 gramas por tonelada transportada, o modal aquaviário é mais eficiente, requerendo 2-3 gramas por tonelada transportada (MCKINNON, 2018). Em geral, é o modal economicamente mais viável e eficiente, necessitando de um baixo investimento para implantação e mitigando impactos ambientais relativos aos demais modais de transporte. A eficiência trazida, juntamente com a necessidade de melhorar a eficiência de transporte de recursos, traz uma maior atenção ao transporte aquaviário, se traduzindo em uma média de crescimento à uma taxa de 5,3% por ano até 2035 (VIMMERSTEDT et al., 2013).

Nesses termos, o Brasil apresenta uma capacidade gigante para o transporte via hidrovias. O país é favorecido por uma extensa malha hidroviária, com uma das redes fluviais mais extensas e diversificadas do mundo, totalizando aproximadamente 63 mil quilômetros de extensão total, dos quais 42 mil quilômetros tem potencial para navegação (MTPA, 2015). Além disso, o país possui aproximadamente 7,5 mil quilômetros de litoral, o que também lhe confere enorme capacidade para utilização de cabotagem.

A cabotagem brasileira, transporte aquaviário entre portos de um mesmo território nacional, abrange os 16 estados situados na costa brasileira (LACERDA, 2004). Segundo SILVA (2015), as rotas que mais merecem destaque, devido ao volume transportado

correspondente a 22,9% e 16% do total transportado pela cabotagem nacional em 2012, são aquelas originárias de plataformas marítimas com destinos ao Rio de Janeiro e São Paulo. Também merecem destaque as rotas entre Maranhão/Pará e o Espírito Santo/São Paulo, com 6,8% e 6,1% do total da cabotagem, respectivamente.

O Brasil se encontra com baixo poder para efetivação de investimentos pelas sucessivas crises que enfrentou no decorrer da última década. É necessário então, decorrente da capacidade limitada de investimento do governo federal, a busca de alternativas que viabilizem o crescimento estimado do país. A cabotagem é uma das alternativas viáveis, visto que não necessita de investimentos em vias, por exemplo. De acordo com Sousa e Leopoldino (2018), são necessários cerca de R\$ 10,00 para manutenção da cabotagem para cada 1.000 TKUs transportados, já para as ferrovias seriam necessários cerca de R\$ 65,00 e rodovias enquanto para as rodovias esse valor seria de R\$ 147,00. Esses fatores confirmam que a aplicação do meio aquaviário de transporte é uma alternativa eficiente como forma de fomentar o crescimento esperado.

Quanto a navegação interior brasileira, essa foi implantada com o papel de facilitadora no período colonial brasileiro, devido à falta de outras vias de acesso e penetração ao interior do país. Segundo Pereira (2007), novos povoados foram gerados através de desbravamentos realizados ao longo de diversos rios, como o rio Tietê, na região sudeste, e rio Amazonas, na região norte. Quanto a carga, a maioria são formadas por materiais sólidos, cerca de 75%, como minérios de alumínio, soja e milho, além de derivados do petróleo.

Dados da ANTAQ (2018), demonstram que em 2018, a navegação interior brasileira transportou 90 milhões de toneladas, destacando-se os granéis sólidos

entre os produtos transportados e as hidrovias dentro da região hidrográfica amazônica, que demonstraram, respectivamente, 65% e 55,68% do total transportado.

Esse tipo de transporte é uma tendência crescente, especialmente em algumas regiões, devido a presença de dois fatores importantes (PADOVEZI, 2003): Rios navegáveis em direções e extensões adequadas ao transporte das principais cargas regionais e a inexistência de concorrência exacerbada de outros modais de transporte. Na região norte do país, por exemplo, o processo de ocupação foi pautado através da utilização dos rios navegáveis, cumprindo atualmente papel de grande destaque na dinâmica econômica e social da região (FURTADO, 1998).

No entanto, apesar de ainda se mostrar bastante incipiente quando comparado com a sua capacidade de uso, o transporte em hidrovias interiores demonstra-se em constante crescimento, correspondendo a 5,4% do total de cargas transportadas no Brasil em 2016, equivalentes à 83,8 milhões de toneladas de carga (MENESCAL et al., 2016). Entre os anos de 2010 e 2018, a movimentação da navegação interior no Brasil cresceu de 30 milhões de toneladas/ano a 61 milhões de toneladas/ano, um crescimento de aproximadamente 105% (ANTAQ, 2018b). Desta forma ainda que seu potencial não seja integralmente explorado, grande parte do volume de cargas está sendo transportado via fluvial rumo aos portos que direcionarão essas cargas para o mercado internacional, principalmente por conta da expansão do agronegócio no Brasil.

Especificamente na região amazônica, há uma maior concentração de embarcações fluviais transportando carga gerais e combustíveis no Brasil. Essas embarcações representam o modal de transporte mais utilizado para escoamento da produção de grãos sólidos no mundo (ZHAO et al., 2016), onde os comboios de empurra são as embarcações tipo utilizadas para realizar o transporte dessa carga por entre a região amazônica. Estes comboios, por sua vez, apresentam diversas vantagens em relação à grande quantidade de carga transportada quando comparado com outros modais, dispondo de grande eficiência energética para grandes volumes de cargas e operações em distâncias maiores (DURÁN-GRADOS et al., 2018).

Quanto a demanda dessas embarcações, essa reflete diretamente o aumento da produção e exportação agrícola brasileira, especialmente a soja e o milho que tem diligenciado elevadas quantidades de embarcações fluviais. Atualmente, a produção agrícola desempenha uma função essencial na economia do Brasil. Por exemplo, a rota da soja, como é conhecido o novo canal de escoamento nacional para o grão, tem movido bastante o cenário do transporte fluvial, assim como influenciado na construção de novas embarcações e também de terminais (LAMEIRA, 2019).

Todavia, para que os sistemas de transporte fluviais consigam aferir ganhos em termos de eficiência de transporte, faz-se necessária a adoção de sistemas propulsivos efetivos nesses comboios de empurra, onde observa-se, conforme Paulides et al. (2016), que em nível mundial, os sistemas que utilizam esse tipo de transporte são dominados pela propulsão diesel-elétrica. A popularidade desse sistema propulsivo é crescente nesse tipo de embarcação devido a potencialidade de redução de 10 a 25% de combustível em alguns tipos de viagens (GELDER, 2014). Analogamente, observa-se na região amazônica que o mercado de transporte fluvial de grãos, especificamente, é dominado pela utilização do sistema propulsivo convencional

(PEREIRA, 2007), como exemplo, as empresas que trafegam pela rota Miritituba-Vila do Conde.

Em decorrência dos fatos apresentados, é fundamental garantir que a embarcação utilize uma instalação propulsora que ofereça manobrabilidade necessária para um segurança estável da embarcação -tanto em situação de navegação plena quanto em situação de parada brusca ou manobras em trechos sinuosos- retendo, também, uma situação confortável quanto aos critérios econômico e de eficiência.

Baseado na proteção do crescimento do agronegócio e na manutenção da região amazônica como rota de transporte, além de investimentos em estrutura de embarcações-tipo que fazem a manutenção do transporte hidroviário brasileiro e amazônico; optou-se a temática da pesquisa na intenção de otimizar experiências futuras no transporte aquaviário regional da Amazônia através da utilização de um sistema propulsivo específico. O conceito compreende estabelecer um termo justificável entre economia, mitigação em influências negativas no meio ambiente e segurança de navegação, assim, impulsionando desenvolvimento econômico e social na região. A seguir, apresentam-se as justificativas e objetivos geral e específicos da pesquisa.

## 1.2. JUSTIFICATIVA

Devido ao processo de globalização, os países estão internacionalizando cada vez mais seus comércios. No caso do Brasil, esse tem utilizado o agronegócio, de forma crescente, como estratégia de inserção na economia global. De acordo com dados da CEPEA (2018), As exportações do agronegócio vêm desempenhando um papel essencial na economia brasileira: O mesmo é responsável pelo saldo positivo da balança comercial do Brasil, representando 25% do PIB nacional (US\$ 88 bilhões em 2018), e também, causam crescimento da renda doméstica. Somente a soja correspondeu a US\$ 41 bilhões desse saldo, onde a maior parte desse total é derivado da exportação de 83,6 milhões de toneladas do grão.

Uma região logística situada ao Norte do país, compreendendo as regiões Norte, Centro-Oeste e Nordeste; propõe a implantação de logística intermodal que diminui a pressão sobre os portos da região Sul e Sudeste. Conhecida como Arco Norte, essa região compreende eixos de transporte que levam a portos situados acima do paralelo 16°S. Em 2016, 20% dos grãos foram escoados pelos portos do Arco Norte (VALE; MONAI, 2016). As exportações da soja realizadas pelos portos do Arco Norte - Itacoatiara (AM), São Luís, Itaqui e Ponta da Madeira (MA), Santarém e Vila do Conde (PA), e Aratu (BA) – ganharam destaque no primeiro trimestre de 2019.

De acordo com a ANEC (2017, 2018, 2019), as exportações por essas rotas somaram 5,7 milhões de toneladas do grão, cerca de 32% mais do que o primeiro trimestre do ano anterior e 30% do total de grãos exportado pelo país no mesmo período, que soma 18,3 milhões de toneladas exportadas, um crescimento de 2,8%. Em 2018, as exportações de soja pelo Arco Norte somaram 24% do total exportado pelo país.

Esses dados demonstram que a exportação da soja nacional vem tendendo a subir em direção ao norte do Brasil de maneira bem expressiva. No porto de Vila do Conde, por exemplo, as exportações do primeiro trimestre de 2019 totalizaram 1,5 milhão de toneladas em comparação com 1,3 milhão exportado no primeiro trimestre de 2018 e 995 mil toneladas no primeiro trimestre de 2017.

O Brasil apresenta vantagens na produção de soja em comparação aos outros produtores mundiais, entretanto, ainda perde em custos logísticos demasiados. Assim, é estritamente necessário melhorias visando redução de custos e tempo de transporte.

Desta forma, é notório que o setor de transportes dessas *commodities* possui empecilhos estruturais relevantes que comprometem diretamente a qualidade dos serviços de transportes prestados e indiretamente o desenvolvimento econômico e social do país. Sem os devidos estudos em investimentos estratégicos, grande parte desses produtos de exportação perderão competitividade internacional ou ficarão aquém da sua capacidade de mercado.

Frente a importância da exportação da soja, especialmente pela região amazônica, o estudo logístico desse produto através do modal hidroviário é relevante. Esse modal de transporte é utilizado nesse estudo por ser o meio mais adequado de exportação do grão para a região amazônica, classificado como o meio mais eficiente para largos volumes de carga transportados em grandes distâncias (TALLURI et al., 2016; ZHAO et al., 2016).

Uma das formas de melhorar a eficiência do sistema de transporte é através da utilização de utilização de metodologias auxiliaadoras de tomadas de decisão, a exemplo da Análise Envoltória de Dados, a qual consiste em uma ferramenta de gestão amplamente aceita e adotada por empresas e pesquisadores do mundo todo. Por meio da metodologia em questão, faz-se possível a obtenção das eficiências relativas e, conseqüentemente, a avaliação dos processos e operações desenvolvidas por uma empresa.

Corroborando com estas informações e tendo em vista o crescimento da produção brasileira de graneis agrícolas, faz-se necessária a otimização de sistemas logísticos capazes de aprimorar

as atividades operacionais. Diante disso, o estudo em questão pauta-se na busca por uma avaliação comparativa entre operações relacionadas ao transporte de grãos.

A avaliação de um sistema propulsivo adequado e/ou conveniente para o tipo de embarcação utilizado na rota investigada é de suma importância para redução de custos e aumento de eficiência do transporte. No caso de transporte realizados em hidrovias interiores, há a necessidade de uma atenção especial para as embarcações, de formas que algumas questões sejam observadas atenciosamente, como a segurança e os impactos ambientais causados. Quanto a questão ambiental, é importante que o impacto gerado decorrente da emissão de poluentes seja mitigado. Assim, a seleção também utiliza esse fato como critério.

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em buscar a otimização de experiências futuras no transporte aquaviário regional da Amazônia através da utilização de um sistema propulsivo específico nas embarcações-tipo da região, realizando análises através de métodos multicritérios, envolvendo o desenvolvimento de avaliação e classificação de opções de sistemas propulsivos a serem implantados no modelo, componente do comboio fluvial típico da rota Miritituba-Vila do Conde. Essa análise é realizada focando na busca de parâmetros que entreguem um sistema com melhor desempenho dentro dos critérios apresentados.

#### 1.3.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são sumariamente apresentados abaixo:

- Inferência de respostas observadas para seleção de critérios a serem utilizados, tratamento dos dados obtidos através de faixas interquartil e diagramas de caixa;
- Classificação, pesagem e avaliação da influência dos critérios analisados;
- Tratamento de dados baseados em respostas de profissionais aderentes à área;
- Análise das notas das alternativas de sistemas propulsivos em relação a cada critério;
- Aplicação do método multicritério híbrido a fim de obter a classificação dos sistemas;
- Análise sensitiva; e
- Comparação das classificações.

#### 1.4. HIPÓTESE

As hipóteses de desenvolvimento desta dissertação fundamentam-se nas seguintes assertivas:

O sistema propulsivo mais utilizado na região estudada não é o mais eficiente para o tipo de navegação utilizado. Em concomitância, a quantidade de estudos nesse âmbito é escassa, fatos estes que tornam importante um estudo que selecione o sistema mais eficiente para a região e que, ao mesmo tempo, analise os sistemas utilizados. Não há um método para a seleção do tipo de propulsão a ser utilizado na navegação em questão, mas um *feeling* de cada projetista separadamente.

#### 1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta seção visa apresentar a estrutura deste trabalho de pesquisa, com destaque para a divisão dos capítulos, conforme a disposição abaixo.

Esse trabalho apresenta uma análise e avaliação de alternativas de sistemas propulsivos e de critérios essenciais à seleção deles para o projeto de comboios fluviais que transportam grãos na rota Miritituba-Vila do Conde. A fim de elucidar a grande necessidade do mercado internacional do agronegócio de grãos, o capítulo 2 apresenta uma visão geral da produção, exportação e demanda no mercado dos grãos. Neste capítulo, busca-se realizar uma breve introdução da necessidade de eficiência no transporte dos produtos, frente à grande produção brasileira.

As características físicas e gerais das hidrovias as quais a rota pertence estão esclarecidas no capítulo 3. São apresentados detalhadamente as particularidades destas hidrovias. Assim, são apresentados pontos de grande importância para a avaliação das alternativas de sistemas propulsivos, já que a seleção dele está intimamente ligada às características da via.

Há a necessidade de uma revisão bibliográfica de alternativas de sistemas propulsivos cabíveis na situação deste trabalho, para que eles sejam analisados e que, assim, seja realizada a seleção. Desta forma, o capítulo 4 apresenta as características gerais dessas alternativas, suas particularidades e restrições. Os dados apresentados nesse capítulo servem de base para as considerações utilizadas na aplicação do método proposto.

O capítulo 5 apresenta uma análise dos meios de avaliação das alternativas apresentadas neste trabalho. Neste capítulo são mostrados os tipos de questionários que poderão ser

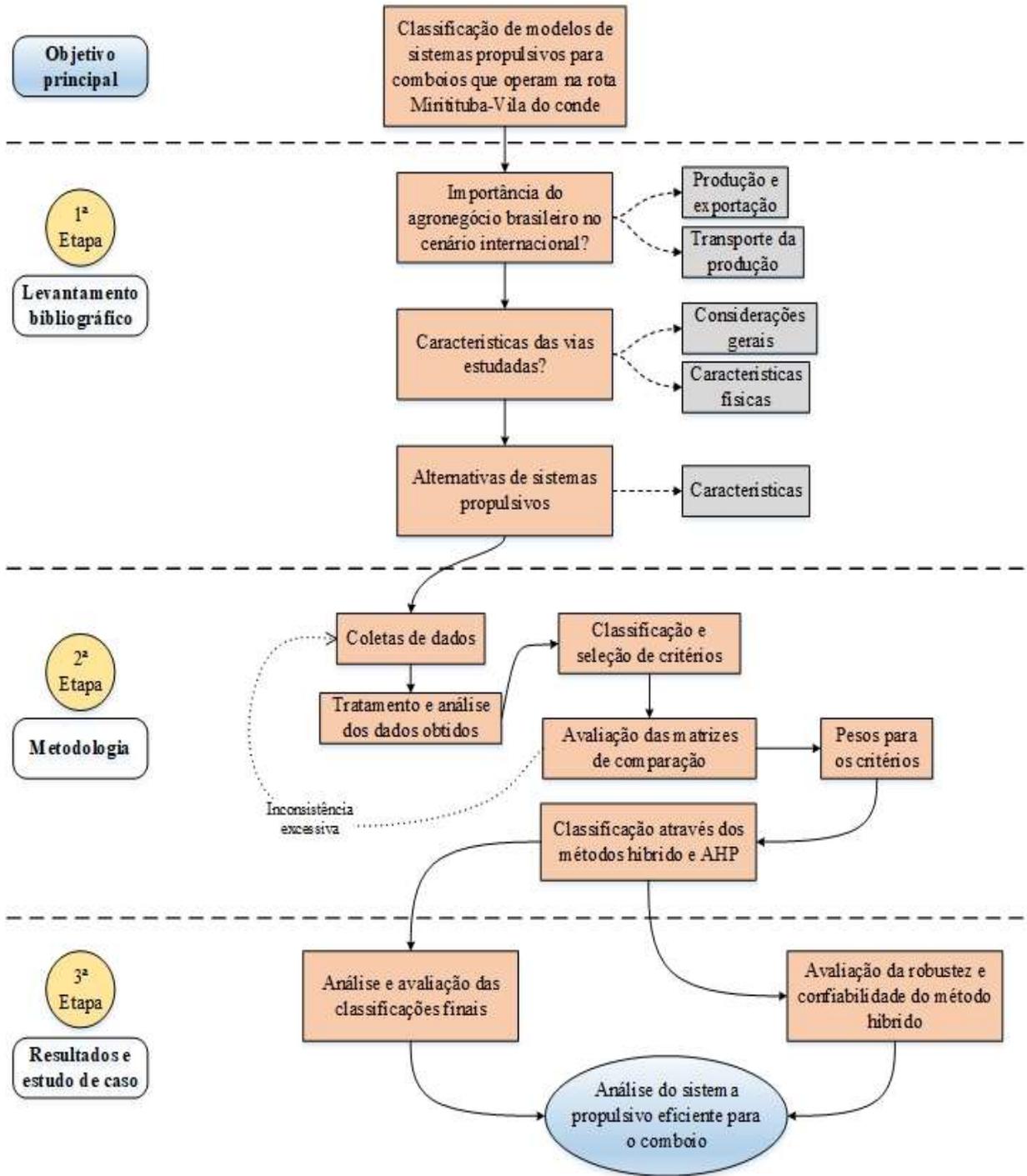
utilizados, assim como seus conceitos. Também são demonstrados o conceito de método de análise multicritério (MCDM) e são discutidos a utilização deles.

A metodologia pela qual é selecionada a alternativa mais adequada de sistema propulsivo para o comboio fluvial é apresentada no capítulo 5. São mostrados os métodos para determinação dos critérios de influência na seleção e os métodos MCDM utilizados para seleção do sistema propulsor. Neste capítulo é demonstrado como os principais critérios de seleção são sintetizados de forma que satisfaçam, da melhor maneira possível, o objetivo deste trabalho.

#### 1.6. FLUXOGRAMA DO TRABALHO

O fluxograma da dissertação informa a subdivisão do trabalho em seus principais tópicos de estudo e organização, direcionando a pesquisa dentro dos objetivos propostos. Baseando-se na estrutura indicada no tópico 1.5, o fluxograma é apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma do trabalho



Fonte: Autor (2021).

## **2. SITUAÇÃO DA PRODUÇÃO E EXPORTAÇÃO DA SOJA FRENTE AO MERCADO INTERNACIONAL**

Este capítulo trata de duas questões essenciais relacionadas à importância do mercado de grãos. Primeiramente, é abordado a questão da importância do agronegócio para a economia brasileira. São abordados dados como médias anuais, atratividade dos produtos brasileiros e volume produzido. Em segundo lugar, é apresentada a situação da exportação da produção brasileira para o mercado internacional. A partir disso, é demonstrado, em síntese, o processo de produção e exportação de soja distribuída através da hidrovía Miritituba -Vila do Conde.

### **2.1 PRODUÇÃO E EXPORTAÇÃO DO AGRONEGÓCIO BRASILEIRO**

Brasil é um dos países com maior capacidade para crescimento de produção agrícola, com climas favoráveis e vastas áreas disponíveis para a agricultura (DIAS et al., 2016). De fato, a atividade agrícola brasileira é estritamente ligada ao desenvolvimento e manutenção política, econômica e social do Brasil desde os tempos de colonização. Desde o início, a atividade econômica do país era voltada para a produção de gêneros de alto valor comercial para o mercado externo (JOSÉ DONATO et al., 2018). Desta forma, no decorrer das últimas cinco décadas, um conjunto de fatores influenciaram para que o Brasil se tornasse um dos protagonistas da exportação de produtos agrícolas (FAO, 2015).

A fim de certificar alimento para a população, crescentemente urbana devido à alta emigração rural, foram instituídas políticas públicas com o intuito de aumentar a produção (e produtividade) agrícola (CHADDAD, 2017). Assim, o intenso processo de modernização das cadeias produtivas do agronegócio brasileiro, sustentados pelos incentivos públicos, fizeram com que as áreas relativas às atividades agrícolas do país ganhassem cada vez mais espaço dentro do Produto Interno Bruto (PIB).

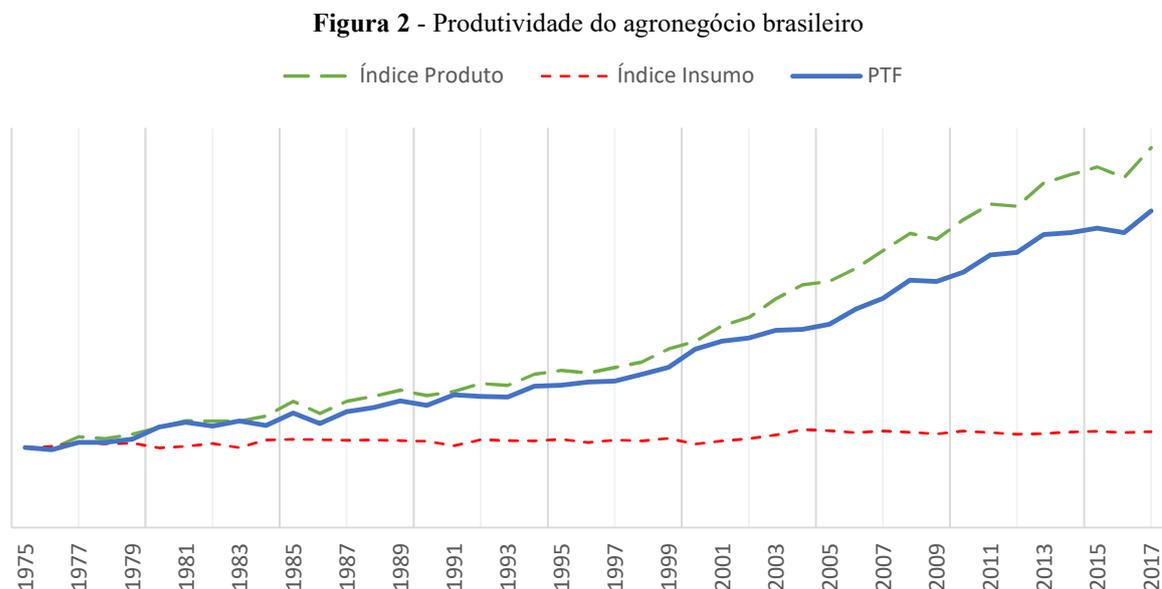
Como resultados dos esforços exercidos pelo governo e, especialmente, pelos produtores rurais o setor agrícola vem obtendo ganhos acentuados de produtividade a partir da década de 90. Atualmente, o alto desempenho das cadeias produtivas nacionais do meio rural contribui significativamente para o desenvolvimento econômico, social e ambiental do país.

Segundo dados da CONAB (2017), na safra de 2017 foi alcançado o recorde de produção de grãos brasileiros, com essa produção sendo distribuído para cerca de 150 países, abarcando todos os continentes. Nesse mesmo ano, a balança comercial do agronegócio registrou um superávit de US\$ 81,7 bilhões no Brasil (AGROSTAT, 2018). Essa produção do meio rural ultrapassa 400 variedades de produtos advindos da agricultura, em diferentes escalas de

unidades produtivas. Essa condição beneficia a geração de emprego e renda, além de preços mais acessíveis de alimentos aos brasileiros.

Segundo Barros (2017), o agronegócio brasileiro, juntamente com serviços indiretos relacionados, empregava 4,12 milhões e 5,67 milhões de pessoas em 2016, respectivamente, enquanto o segmento de insumos da agroindústria é responsável por 227,9 mil empregos. Nesse mesmo período, o agronegócio representava cerca de 24% do PIB, responsável também por 45,9% da renda gerada das exportações.

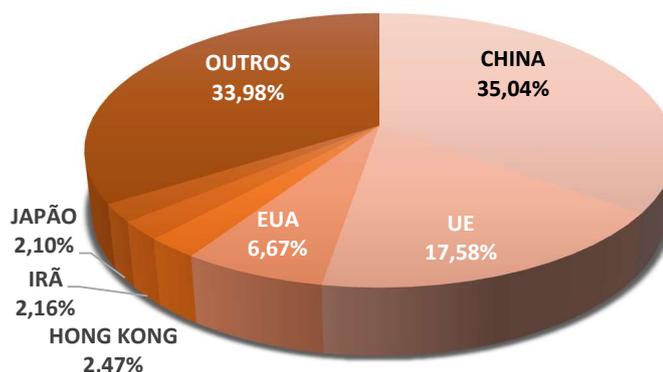
Em uma análise sobre a produtividade do agronegócio, é observado um incremento na produtividade de qualquer fator de produção que seja avaliado, seja mão de obra, terra ou capital (GASQUES, 2017). De acordo com a Figura 2, a produtividade da mão de obra cresceu 5,4 vezes entre 1975 e 2015, enquanto a terra cresceu 4,4 vezes e do capital 3,3 vezes.



**Fonte:** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2018) adaptado

Graças às safras, sucessivamente recordistas em produção, o Brasil consegue atrair grandes empresas internacionais que contribuem na melhoria da qualidade produtiva do agronegócio. Quanto à importância do agronegócio para a balança comercial brasileira, é fundamental destacar as negociações com a China e União Europeia, que atualmente são os principais compradores da produção nacional agrícola (Figura 3). Além disso, o agronegócio brasileiro é responsável por 23,6% do PIB e 45,9% das exportações brasileiras, algo em torno de US\$ 71 milhões (BOLFE, 2018).

**Figura 3** - Principais compradores da produção agrícola brasileira



Fonte: AGROSTAT (2018) adaptado

Assim, é importante mencionar que, além dos impactos na renda dos produtores rurais, as expansões da produção e produtividade do agronegócio geraram impactos positivos nos âmbitos social e ambiental, graças a redução de insumos utilizados. Assim, a produção agrícola brasileira desempenha uma posição central quanto à logística e economia do país.

Sobre a dinamicidade dos produtos do agronegócio brasileiro, segundo projeções realizadas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, os produtos mais dinâmicos na década decorrente deverão ser carne suína, soja, algodão, celulose, milho, carne de frango, leite e açúcar. Tanto a demanda internacional quanto a interna são os principais fatores incentivadores de crescimento para estes produtos, sendo também, os principais indicadores do potencial de crescimento da produção nos próximos 10 anos.

A produção de grãos deverá passar de 236,7 milhões de toneladas em 2018/2019 para 300 milhões em 2028/2029, o que indica um acréscimo de aproximadamente 63 milhões de toneladas em produção no decorrer de uma década (Tabela 1). Desta forma, a área de plantação de grãos deverá expandir-se dos atuais 62,8 milhões de hectares para aproximadamente 72 milhões de hectares em 2029.

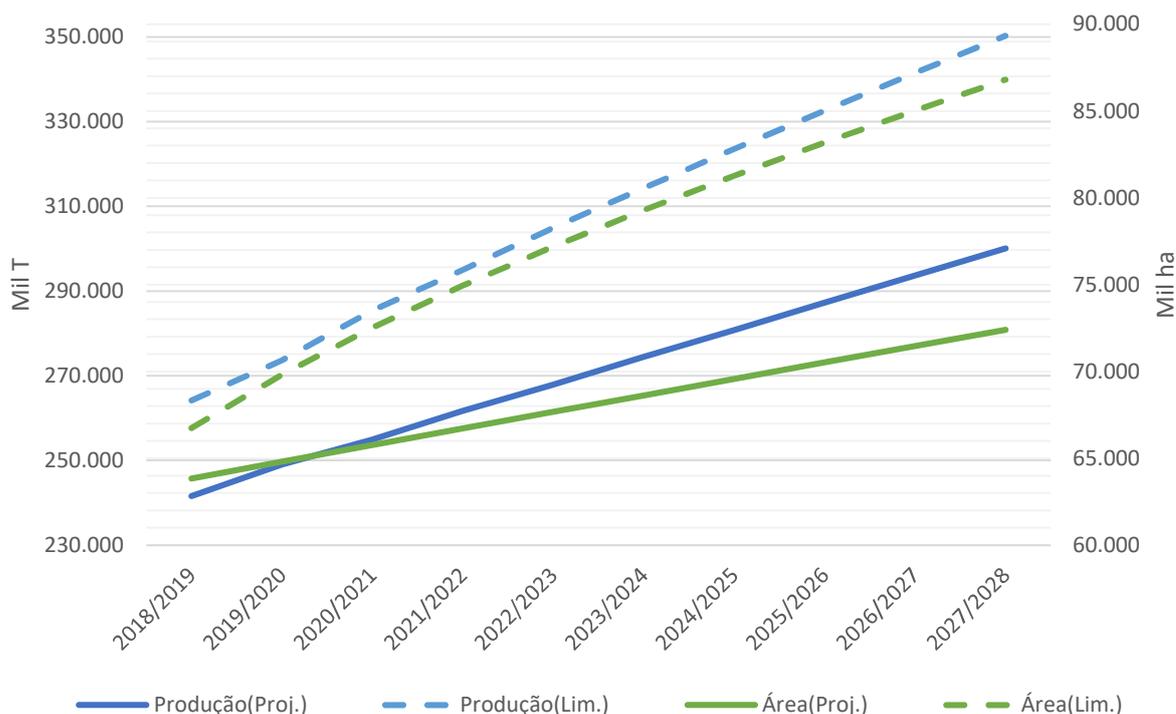
Dentre esses grãos, o que tem requerido fortes demandas de embarcações fluviais é a soja. Neste ponto, a rota da soja tem movimentado de forma extensiva a área naval, inclusive os estaleiros e envolvidos afins, para construção de embarcações novas e terminais especializados em atender essas demandas (LAMEIRA, 2019), como também o transporte fluvial.

**Tabela 1 - Projeções para a produção e área plantada de grãos**

	Produção (mil t)		Área (mil ha)		
	Projeção	Lsup	Projeção	Lsup	
2018/2019	236.718	-	62.820	-	<b>Varição % 2018/2019 a 2028/2029</b> <hr/> Produção (mil t)   26,8% Área (mil há)   15,3%
2019/2020	241.652	264.183	63.835	66.749	
2020/2021	249.044	273.668	64.806	69.825	
2021/2022	254.895	285.463	65.766	72.529	
2022/2023	261.684	295.007	66.718	74.963	
2023/2024	267.892	304.996	67.669	77.202	
2024/2025	274.455	314.281	68.618	79.297	
2025/2026	280.799	323.578	69.568	81.286	
2026/2027	287.278	332.583	70.517	83.190	
2027/2028	293.674	341.509	71.466	85.029	
2028/2029	300.121	350.277	72.415	86.812	

Fonte: CONAB adaptado

**Figura 4 - Projeções para produção e área plantada de grãos**



Fonte: CONAB adaptado

A produção de soja na América do Sul se tornou altamente expressiva nos últimos anos, tornando-se um símbolo da produção de *commodities* em fazendas de grande escala, altamente mecanizadas associadas a agronegócios corporativos e voltados para o comércio internacional (GIBBS et al., 2015; MIER; CACHO, 2016). Além disso, a utilização da imagem político-social dessa alta produção, tanto por quem defende a expansão da produção quanto pelos grupos que criticam suas implicações ambientais negativas, provocaram a construção de um

estereotipo homogêneo de produtores (e produção) de soja; particularmente no estado do Mato Grosso, onde as escalas de produção estão entre as maiores do mundo (MIER; CACHO, 2016).

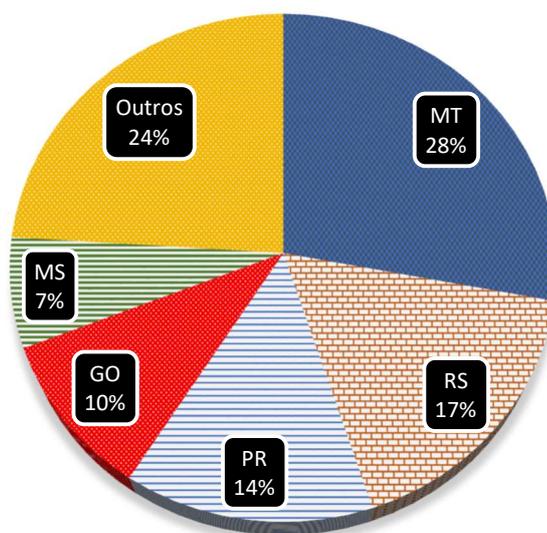
De acordo com o estudo de Projeções do Agronegócio de 2018/2019 a 2028/2029, realizado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, a produção de soja no país para 2018/2019 é estimada em 114,3 milhões de toneladas. Essa produção é liderada pelos estados de Mato Grosso, Paraná, Rio Grande do Sul, Goiás e Mato Grosso do Sul, respectivamente (Figura 5). Entretanto, é importante ressaltar, atualmente a produção de soja migra também para áreas situadas nos estados de Maranhão, Tocantins, Pará, Rondônia, Piauí e Bahia, que juntos representaram 14% da produção brasileira. A produção desses estados correspondeu a 16 milhões de toneladas (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2019).

A região do Mato Grosso representa as maiores e mais tecnológicas plantações extensivas de soja no Brasil. Desde os anos 1999-2000, o estado ultrapassou as produções do sul do país. Em 2017/2018, o estado produziu 31.887 milhões de toneladas, representando 29 por cento da produção nacional (EMBRAPA, 2019).

Os indicadores analisados por essas projeções - como expansão de produção e preços de terras - demonstram nitidamente a tendência de crescimento da agricultura no norte do país, principalmente nos estados de Mato Grosso, Rondônia, Tocantins e Pará. Essa não é uma expansão recente, todavia as projeções realizadas para esta região denotam claramente o crescimento em direção ao norte. Isso se dá devido aos preços atrativos das terras desses locais, o clima correspondente e o relevo favorável, apesar dos mesmos possuírem deficiências em infraestrutura.

Quanto a importância do produto soja para a humanidade, este se constitui como uma das maiores fontes vegetais de proteína no mundo (SUGIYAMA et al., 2015). De acordo com WYNSTRA e PROGRAM (1986), é o alimento que possui o maior teor proteico de todas as culturas alimentares e o segundo maior em relação ao teor de óleo entre as leguminosas, perdendo apenas para o amendoim. Além disso, a cultura de soja também é utilizada para a aquicultura e produção de biodiesel, tanto quanto é fonte de proteínas para a humanidade (MASUDA; GOLDSMITH, 2009).

**Figura 5** - Produção de soja em grão por estado (2018/2019)



Fonte: CONAB adaptado

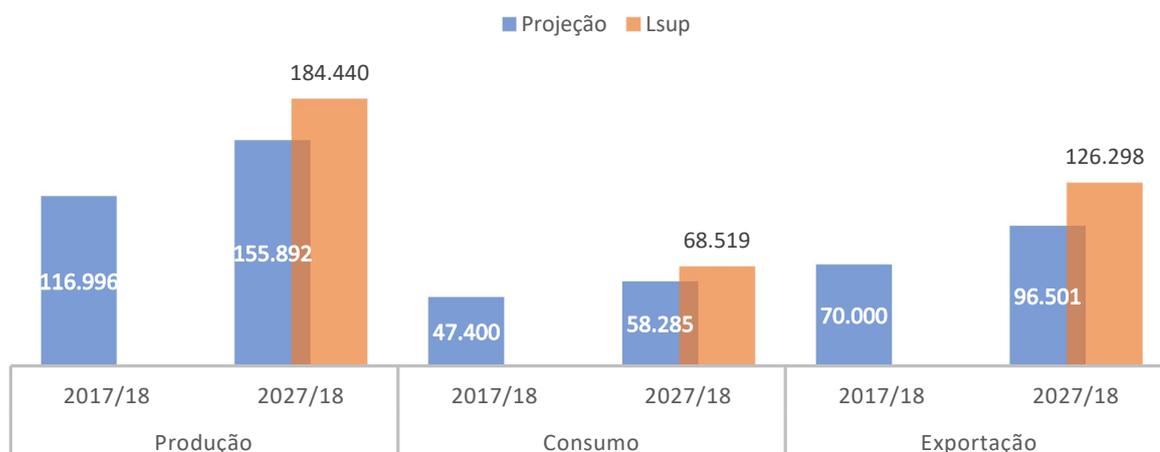
Segundo dados da CONAB (2018), nas novas áreas do Centro-nordeste e Norte do Brasil, que compreendem a região do Matopiba<sup>1</sup> e Arco Norte, a área plantada de soja deve continuar em expansão no Brasil. Nesse sentido, a área plantada de grãos nessas regiões deve expandir em cerca de 16% nos próximos anos. Dessa forma, a produção dessa região deve continuar a expandir-se, onde o limite superior dessa produção pode atingir 29 milhões de toneladas de grãos, embora seja condicionado a disponibilidade hídrica.

As projeções de exportações de soja em grão do país para os próximos 10 anos são de 96,5 milhões de toneladas. Esse número representa um crescimento próximo a 27 milhões de toneladas em relação a quantidade atual de soja exportada. A variação prevista para esse aumento, de 2027/2028 relativamente a 2017/2018, é de um crescimento de 38% quanto ao aumento de quantidade exportada de soja em grão (USDA, 2019).

Já alguns derivados de soja, como o farelo e óleo de soja, demonstram um dinamismo um tanto moderado na produção dos próximos anos, o que torna o aumento nas exportações desse produto algo mais ameno. Segundo as projeções da SIRE/EMBRAPA as exportações de farelo devem apresentar um aumento em torno de 7%, enquanto as exportações de óleo devem reduzir no próximo decênio.

<sup>1</sup> Região formada pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Atualmente, diversas transformações socioeconômicas vêm ocorrendo decorrente da expansão do agronegócio nessa região.

**Figura 6** – Produção, Consumo e Exportação de Soja em Grão (mil toneladas)



**Fonte:** USDA (2019) adaptado

Quanto as projeções de exportação de soja pelo Estado do Pará, região incluída no Arco Norte, são estimadas que nos próximos 10 anos a exportação pelo estado aumente cerca de 63,1% (Tabela 2). Esse aumento demandará cerca de 2 milhões de toneladas de grão de soja exportadas pelo estado, um crescimento de 800 mil toneladas na quantidade atual exportada pelo estado.

## 2.2 TRANSPORTE DA PRODUÇÃO DE GRÃOS PELO NORTE DO PAÍS

O Brasil vem utilizando o agronegócio brasileiro como uma importante estratégia de inserção econômica mundial. As exportações dos produtos agrícolas desempenham um papel crucial no aumento da renda doméstica, resultando em uma maior competitividade do país diante da concorrência internacional.

As exportações das *commodities* brasileiras continuam em um forte crescimento no decorrer das últimas décadas, entretanto com a desestabilização da economia brasileira e a oscilação do processo inflacionário, os agentes econômicos reassumiram a noção de preços relativos, expondo ineficiências da infraestrutura que reduzem a competitividade dos produtos agrícolas brasileiros.

**Tabela 2 - Projeções de exportação de regiões selecionadas de 2017 a 2028**

Produção	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22	2022/23	2023/24	2024/25	2025/26	2026/27	2027/28	Tx. Cresc. 2017/18 a 2027/28	Var. % 2017/18 a 2027/28
<b>Soja - Mil Toneladas</b>													
<b>BA</b>	<b>1.716</b>	<b>3.212</b>	<b>2.017</b>	<b>3.339</b>	<b>2.306</b>	<b>3.477</b>	<b>2.586</b>	<b>3.624</b>	<b>2.857</b>	<b>3.779</b>	<b>3.121</b>	<b>4,6</b>	<b>81,9</b>
Linf.	924	2.419	929	2.247	1.008	2.172	1.121	2.149	1.252	2.161	1.394	-0,5	-18,8
Lsup.	2.508	4.006	3.104	4.431	3.605	4.782	4.051	5.099	4.463	5.396	4.849	7,4	182,6
<b>GO</b>	<b>5.025</b>	<b>5.246</b>	<b>5.466</b>	<b>5.686</b>	<b>5.907</b>	<b>6.127</b>	<b>6.347</b>	<b>6.567</b>	<b>6.788</b>	<b>7.008</b>	<b>7.228</b>	<b>3,7</b>	<b>43,8</b>
Linf.	4.006	3.804	3.701	3.648	3.628	3.631	3.651	3.685	3.731	3.786	3.849	-1,2	23,4
Lsup.	6.044	6.687	7.231	7.724	8.185	8.623	9.043	9.450	9.845	10.230	10.608	6,4	111,1
<b>MA</b>	<b>1.083</b>	<b>1.985</b>	<b>1.223</b>	<b>2.084</b>	<b>1.363</b>	<b>2.183</b>	<b>1.501</b>	<b>2.283</b>	<b>1.638</b>	<b>2.384</b>	<b>1.774</b>	<b>4,0</b>	<b>63,8</b>
Linf.	661	1.562	633	1.493	648	1.467	684	1.466	735	1.480	795	-1,2	-26,6
Lsup.	1.506	2.408	1.814	2.674	2.077	2.898	2.317	3.101	2.541	3.289	2.753	6,9	154,2
<b>MG</b>	<b>2.748</b>	<b>2.869</b>	<b>2.991</b>	<b>3.112</b>	<b>3.234</b>	<b>3.356</b>	<b>3.477</b>	<b>3.599</b>	<b>3.720</b>	<b>3.842</b>	<b>3.964</b>	<b>3,7</b>	<b>44,3</b>
Linf.	2.055	1.890	1.792	1.728	1.686	1.660	1.646	1.641	1.644	1.653	1.668	-3,1	-39,3
Lsup.	3.440	3.848	4.190	4.497	4.782	5.051	5.309	5.557	5.797	6.031	6.259	7,0	127,8
<b>MS</b>	<b>3.570</b>	<b>3.835</b>	<b>3.961</b>	<b>4.145</b>	<b>4.305</b>	<b>4.474</b>	<b>4.640</b>	<b>4.807</b>	<b>4.974</b>	<b>5.141</b>	<b>5.307</b>	<b>3,9</b>	<b>48,7</b>
Linf.	2.816	2.959	2.916	2.977	3.018	3.082	3.148	3.223	3.301	3.385	3.472	0,9	-2,7
Lsup.	4.324	4.710	5.007	5.312	5.591	5.867	6.132	6.392	6.646	6.897	7.143	5,9	100,1
<b>MT</b>	<b>18.702</b>	<b>17.792</b>	<b>18.545</b>	<b>19.299</b>	<b>20.053</b>	<b>20.807</b>	<b>21.560</b>	<b>22.314</b>	<b>23.068</b>	<b>23.822</b>	<b>24.576</b>	<b>3,3</b>	<b>31,4</b>
Linf.	16.337	14.447	15.149	15.852	16.555	17.260	17.964	18.670	19.376	20.083	20.790	2,8	11,2
Lsup.	21.067	21.136	21.942	22.746	23.550	24.354	25.156	25.958	26.760	27.561	28.361	3,8	51,6
<b>PA</b>	<b>1.252</b>	<b>1.331</b>	<b>1.410</b>	<b>1.489</b>	<b>1.568</b>	<b>1.647</b>	<b>1.726</b>	<b>1.805</b>	<b>1.884</b>	<b>1.963</b>	<b>2.042</b>	<b>5,0</b>	<b>63,1</b>
Linf.	1.044	1.036	1.049	1.072	1.102	1.136	1.174	1.215	1.259	1.304	1.351	2,0	7,9
Lsup.	1.460	1.626	1.771	1.906	2.034	2.158	2.278	2.395	2.509	2.622	2.733	7,0	118,3
<b>PR</b>	<b>11.330</b>	<b>11.736</b>	<b>12.143</b>	<b>12.549</b>	<b>12.955</b>	<b>13.361</b>	<b>13.767</b>	<b>14.174</b>	<b>14.580</b>	<b>14.986</b>	<b>15.392</b>	<b>3,1</b>	<b>35,9</b>
Linf.	9.483	9.125	8.944	8.855	8.826	8.838	8.881	8.950	9.040	9.146	9.267	-0,8	-18,2
Lsup.	13.177	14.348	15.341	16.242	17.084	17.885	18.653	19.397	20.120	20.826	21.517	5,6	89,9
<b>RO</b>	<b>936</b>	<b>994</b>	<b>1.052</b>	<b>1.110</b>	<b>1.168</b>	<b>1.227</b>	<b>1.285</b>	<b>1.343</b>	<b>1.401</b>	<b>1.459</b>	<b>1.517</b>	<b>4,9</b>	<b>62,0</b>
Linf.	791	789	801	820	843	871	900	932	965	999	1.035	2,1	10,6
Lsup.	1.081	1.200	1.304	1.401	1.493	1.582	1.669	1.754	1.837	1.918	1.999	6,8	113,5
<b>RS</b>	<b>11.628</b>	<b>12.843</b>	<b>12.999</b>	<b>13.734</b>	<b>14.153</b>	<b>14.744</b>	<b>15.241</b>	<b>15.790</b>	<b>16.310</b>	<b>16.846</b>	<b>17.373</b>	<b>3,8</b>	<b>49,4</b>
Linf.	8.359	9.253	8.648	8.976	8.903	9.106	9.209	9.403	9.580	9.793	10.010	-0,1	-13,9
Lsup.	14.898	16.433	17.350	18.492	19.402	20.382	21.273	22.176	23.040	23.898	24.737	6,2	112,7
<b>TO</b>	<b>1.867</b>	<b>1.898</b>	<b>2.114</b>	<b>2.146</b>	<b>2.256</b>	<b>2.373</b>	<b>2.458</b>	<b>2.564</b>	<b>2.665</b>	<b>2.763</b>	<b>2.865</b>	<b>4,4</b>	<b>53,4</b>
Linf.	1.569	1.380	1.536	1.456	1.482	1.534	1.550	1.594	1.639	1.681	1.731	0,8	-7,3
Lsup.	2.165	2.417	2.692	2.835	3.031	3.212	3.367	3.534	3.692	3.845	3.999	6,7	114,2

Fonte: SIRE/Embrapa adaptado

Um estorvo notável para os produtos de exportação no Brasil é relacionado a logística de transporte dos mesmos. O transporte precário de infraestrutura entre fontes primárias e de produção para a exportação se mostra como um enorme prejuízo para o país. O melhor aproveitamento do transporte hidroviário é essencial, além do aperfeiçoamento da produtividade dos portos. A competitividade dos produtos brasileiros perde espaço quando

esses saem dos produtores à preços baixos e chegam ao destino com custos altíssimos por causa dos empecilhos na logística.

O transporte é o elemento mais importante dentro de uma cadeia logística (HA; YANG; LAM, 2019; SEO; DINWOODIE; ROE, 2016). O desenvolvimento precário de um sistema de transportes acarreta numa limitação às áreas imediatamente próximas aos produtores. Portanto, o conhecimento de vários modais de transporte e as cargas submetidas a cada uma são objetos fundamentais para a criação e desenvolvimento de uma logística adequada. Segundo Urry (2016), o sistema de transporte configura a melhor integração entre sociedades, o que permite uma melhora na disponibilidade de bens e produtos em uma extensão de mercados consumidores das empresas.

Entregar o produto no destino certo, dentro do prazo esperado e com o menor custo possível é a base para um sucesso logístico. Para tal, o uso do modal de transporte mais adequado é essencial para obtenção de uma vantagem competitiva. Em segunda instância, é de grande importância para a vantagem competitiva a capacidade da empresa de distinguir-se positivamente das demais.

Dos modais de transporte existentes três são utilizados no escoamento de soja no Brasil: Rodoviário, ferroviário e aquaviário. Devido as características físicas do produto, o modal dutoviário não pode ser utilizado, enquanto a não-utilização do modal aeroviário é consequência do mesmo ser extremamente caro para utilização no transporte de *commodities*.

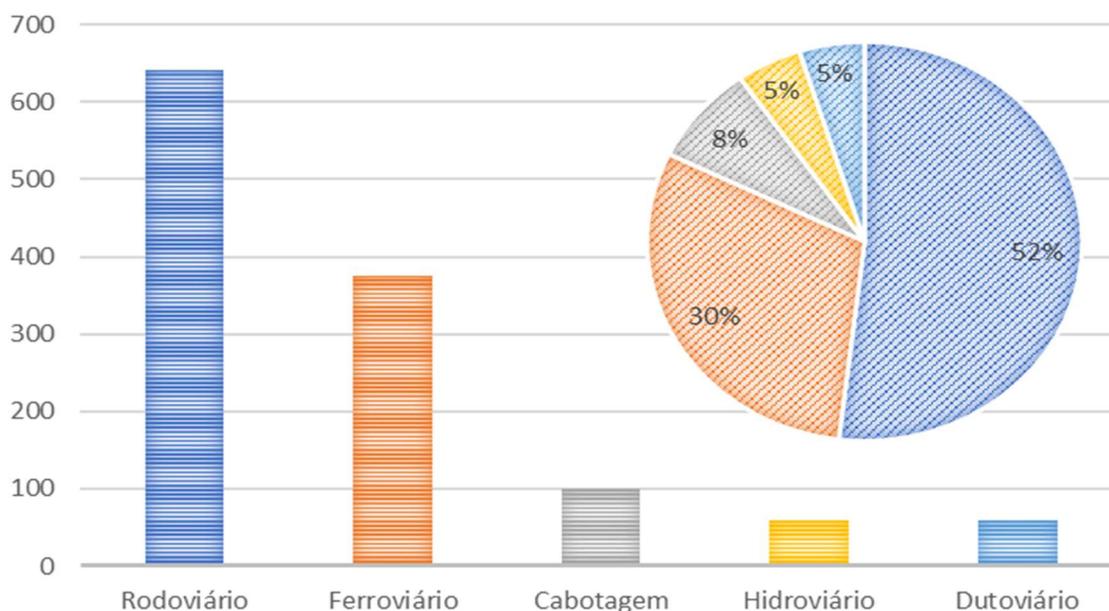
Um levantamento realizado pelo Instituto de Logística e *Supply Chain* (ILOS) do Rio de Janeiro, revelou que o Brasil tem a pior dentre as infraestruturas logísticas dos países componentes do BRICS<sup>2</sup>. Segundo dados do DNIT (2018), o Brasil dispõe de 33.765 quilômetros de rodovias com pavimentação aceitável, parcela de 59% das rodovias. Mesmo assim, o país continua a transportar 52% das suas cargas através das estradas.

Na Figura 7 é demonstrada a matriz de transporte de carga brasileira, que mostra a participação predominante do modal rodoviário. O desequilíbrio de usos destes modais de transporte de cargas é extremamente prejudicial ao Brasil, atrapalhando o escoamento da produção, devido as perdas durante a origem e o destino levando a prejuízos altos.

---

<sup>2</sup> Brasil, Rússia, Índia e África do Sul - Um grupo de países que constituem uma formação contemporânea, em termos econômicos, e moveram o centro do palco do mundo em um curto espaço de tempo (NAYYAR, 2016).

**Figura 7** - Distribuição modal da matriz brasileira de transporte de cargas (Bilhões de TKU's e porcentagem)



**Fonte:** BARROS; CARVALHO; PARANAIBA (2018) adaptado

O desafio brasileiro é expandir a participação de outros modais de transporte, aferindo ganhos em termos de eficiência de transporte para certos tipos de cargas. De acordo com Buurman (2002) e Christopher (2016), essa expansão deve-se operar integrando a obtenção de sucesso no mercado, baseando-se em sistemas de gerenciamento de operações, e sustentabilidade, visando uma vantagem competitiva contínua no mercado.

As dimensões continentais do Brasil, tomando às necessidades extremamente elevadas de exportação das *commodities* revelam uma enorme potencialidade do modal aquaviário para o transporte de produtos. Esta potencialidade é especialmente relevante para o transporte de produtos agrícolas, minerais, químicos e derivados de petróleo.

A malha hidrográfica brasileira é dividida em 12 regiões hidrográficas (Figura 8), instituídas pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH. No que se refere à profundidade, largura do canal de navegação, raios de curvaturas ou presença de obstáculos na via, as malhas oferecem condições adversas e variantes de navegabilidade, que também variam de rio para rio.

A utilização do modal hidroviário no transporte de grãos pode ser considerado uma grande vantagem competitiva. Segundo JEANS (2018), o transporte aquaviário é caracterizado

por utilizar qualquer meio hidrológico para locomoção, como rios, lagos e oceanos, dentro de um país ou de forma internacional.

**Figura 8** - Regiões hidrográficas do Brasil



**Fonte:** Autor (2021).

De acordo com a ANTAQ (2012), quando comparado com o custo de construção e implementação de outros modais, as hidrovias possuem um custo muito baixo para implementação. Entretanto, quando há a necessidade de construção de infraestruturas especiais (eclusas, barragens, canais, etc), este custo pode ser bastante elevado.

Esse tipo de modal pode ser dividido em subsistemas de transportes (MEDINA et al., 2010; MOURA; BOTTER, 2011): O transporte hidroviário ou fluvial, realizado através de rios navegáveis, e transporte marítimo, que abrange a navegação costeira, de longo curso realizada através do mar e de cabotagem, realizada através de portos marítimos de um mesmo país. De acordo com o MTPA (2015), o Brasil possui um sistema de transporte hidroviário com 7,5 mil quilômetros constituindo suas vias marítimas e, segundo a ANTAQ (2018), um total aproximado de 42 mil quilômetros de rede hidroviária com potencial navegável.

A função dos rios como via de comunicação e transporte é primordial em todo o Brasil, mas especialmente na região amazônica. Em certas áreas desta região os rios são o principal meio de transporte e locomoção da população local, funcionando como “estradas de água”. A

população e mercadorias que circulam através desses rios só conseguiriam chegar em seus destinos através de vias aéreas de outra forma.

De acordo com Smith (2012) e Zhao et al. (2016), o modal aquaviário tipicamente mais eficiente para o transporte e exportação de grandes volumes, em longas distâncias e disponibilizando um valor agregado relativamente baixo. Tal modal, embora exija um maior tempo de transporte, têm a capacidade de transporte de carga bem mais elevado que os demais e tem grande possibilidade de economia de custos e redução de perdas. Neste caso, o papel rodoviário, por sua vez, seria o de atuar nas “pontas”, transportando os grãos aos terminais de exportação. Entretanto, mesmo possuindo um território de dimensões grandiosas, o Brasil é um país tipicamente rodoviário.

Ainda que a conjuntura do transporte de cargas no Brasil seja de caráter majoritariamente rodoviário, no primeiro trimestre de 2019 a navegação interior brasileira conquistou números acima dos ainda registrados, mesmo que o momento atual da movimentação de cargas através de meios aquaviários seja de retração. O crescimento desse tipo de transporte correspondeu à 17,8% do período, equivalente a mais de 2,4 milhões de toneladas movimentadas no mesmo período de 2018. Da movimentação total, merece destaque a movimentação de soja, que movimentou 7.542.530 toneladas de carga nesse trimestre, um aumento de cerca de 13% para o mesmo período do ano anterior (ANTAQ, 2019).

A Tabela 3 mostra a quantidade de toneladas movimentadas, assim como a participação de cada mercadoria na navegação interior no primeiro trimestre de 2019.

**Tabela 3** - Principais mercadorias movimentadas na navegação interior - 1º Trimestre/2019

RANKING	MERCADORIAS	TONELADAS	Var%
			1ºT 2018/ 1ºT 2019
1º	Soja	7.542.530	13,6%
2º	Petróleo e Derivados	1.632.238	24,4%
3º	Milho	888.718	72,0%
4º	Pasta de Celulose	778.058	-2,0%
5º	Semirreboque Baú	707.765	2,5%
6º	Produtos Químicos Orgânicos	669.579	4,2%
7º	Bauxita	579.423	-
8º	Minério de Ferro	514.384	-18,8%
9º	Resíduos da extração do óleo de soja	330.056	32,6%
10º	Contêineres	324.969	16,3%
	Demais Mercadorias	1.856.342	11,0%

Fonte: ANTAQ (2019)

Na navegação interior, a maior parte das mercadorias são movimentadas em portos privados, o que corresponde a aproximadamente 73% do total observado. Observa-se ainda que, atualmente, dentre as dez principais instalações portuárias na movimentação de cargas na navegação interior, 9 estão concentradas nas regiões Norte/Centro-Oeste brasileiro, que juntas movimentam cerca de 45% do total de cargas através desse modal.

A Tabela 4 apresenta as principais instalações portuárias na movimentação de cargas via navegação interior.

**Tabela 4** - Principais instalações portuárias na movimentação em navegação interior

<b>PORTO PÚBLICO PRIVADO</b>	<b>UF</b>	<b>TONELADAS</b>	<b>Var% 1ºT 2018/ 1ºT 2019</b>
Santarém	PA	1.684.931	56,4%
Porto Velho	RO	810.393	18,8%
Terminal Graneleiro Hermasa	AM	802.973	-41,2%
Rio Grande	RS	800.150	4,0%
Hidrovias do Brasil Miritituba	PA	785.072	64,9%
Terminal de Expedição	RO	743.628	-8,5%
Terminal Vila Do Conde	PA	685.821	44,5%
Terminais Fluviais Do Brasil	AM	620.141	74,7%
Estação Cujubinzinho	RO	615.264	21,6%
Terfron Itaituba	PA	547.871	49,3%
Demais Instalações		7.727.817	18,1%

Fonte: ANTAQ (2019)

Da Tabela 4, pode-se aferir que os terminais que compõem a rota Miritituba – Vila do Conde, cresceram sua movimentação em aproximadamente 54% no último ano, integralmente composta por embarques de graneis agrícolas, notadamente a soja.

Já a distribuição por região hidrográfica apresenta a região amazônica com aumentos de 10,4% na movimentação de mercadorias e 51,2% de participação no mercado, representando atualmente 5,7 milhões de toneladas transportadas nessa região. Das cargas transportadas nessa região, a soja se destaca com uma movimentação de 3,3 milhões de toneladas no período, com uma participação de 58,8% de participação do transbordo total na região amazônica.

Diante da importância do transporte de commodities através da navegação fluvial por entre a região amazônica, precisamente no decorrer dos portos de Itaituba e Barcarena, é importante estudos que agreguem valor em relação à efetividade desse tipo transporte. Ainda no caso do transporte fluvial, há a necessidade de uma atenção especial para as embarcações, se atentando para questões envolvendo a segurança e os impactos ambientais causados pela utilização desse meio. Dessa forma, é importante garantir que a embarcação seja dotada de um sistema

propulsivo que ofereça navegação plena em diversos aspectos e condições. Além disso, o critério econômico, que de forma tácita limita a escolha de solução utilizadas nas vias atualmente, serão analisados no presente estudo.

### 3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS HIDROVIAS

Neste capítulo são apresentadas, de forma sucinta, as principais peculiaridades das hidrovias que influenciam a navegação realizada na mesma, assim, influenciando também no projeto dos comboios fluviais. Foram analisados pontos importantes que têm influência direta no projeto de novas embarcações para tráfego nessa via, principalmente quando estes adotarem diferentes tipos de sistemas de propulsão.

#### 3.1 HIDROVIA DO TAPAJÓS-TELES PIRES

De acordo com Fajardo (2008), a hidrovia Tapajós- Teles pires é estrategicamente posicionada para o transporte de *commodities* pela região Norte do país, conectando os principais centros de produção agrícola do Brasil ao rio Amazonas, que tem conexão ao Oceano Atlântico. Segundo Cid e Cid (2018), essa hidrovia tem uma extensão de 843 quilômetros da foz em Santarém (PA), a 950 quilômetros de Belém, capital do estado do Pará, e 750 quilômetros de Manaus, capital do estado do Amazonas; até a convergência dos rios Teles Pires e Juruena, localizados na fronteira dos estados do Pará, Amazonas e Mato Grosso.

Entra as principais características dessa hidrovia está dessa ser um importante corredor logístico e de transporte entre o Centro-Oeste e o Norte brasileiro. Ligado a outros modais de transporte do corredor logístico do Norte-Eixo Tapajós, o Tapajós-Teles pires tem a capacidade de aprimorar as atividades do agronegócio brasileiro e produção de grãos nas regiões Norte e Centro-Leste do estado do Mato Grosso e Sudoeste do estado do Pará (CID; CID, 2018).

Além de apoiar o transporte de mercadorias na região, a hidrovia possibilita rotas alternativas para o fluxo de produção no Centro-Sul do país, descongestionamento de outros modais de transporte e também infraestrutura portuária. Desta forma, a hidrovia Tapajós-Teles Pires pode então ser considerada a de maior vocação para a circulação de bens e para a implementação do comércio exterior na região. A principal via de acesso da hidrovia é pela BR-163, Cuiabá-Santarém.

#### 3.2 HIDROVIA DO AMAZONAS

De acordo com Neto e Nogueira (2019), a hidrovia do Amazonas é responsável por cerca de 65% do total de cargas transportadas na região Norte, sendo a principal via de transporte e escoamento de mercadorias nessa região. A mesma apresenta uma extensão de 1.646 quilômetros, percorrendo bacias dos rios Foz do Amazonas, Jatapu, Negro, Madeira, Tapajós e etc.

Uma característica interessante dessa hidrovia é o fato de ela ser navegável em praticamente toda sua extensão e todos os seus afluentes, devido à grande profundidade da calha da planície amazônica não possuírem corredeiras ou desníveis (LIMA, 2017). Nessa hidrovia são realizados deslocamentos de passageiros, transportes de cargas e, em quase sua totalidade, o transporte de cargas são direcionados aos grandes centros regionais.

De acordo com a ANTAQ (2012), a média anual de movimentação de cargas desde o início da década tem sido de cerca de 50 milhões de toneladas por ano. A ligação com a hidrovia do Madeira e Tocantins-Araguaia fomentam a ampliação do transporte aquaviário na região.

Mesmo durante a estiagem, a hidrovia permite a navegação de comboios com até 18 mil toneladas. A largura varia entre 440 metros e 9.900 metros, e a profundidade oscila de acordo com as estações seca e chuvosa, e pode chegar a 13 metros (LIMA, 2017).

Essa hidrovia é substancial para o comércio interno e externo da região Norte, já que propicia a oferta de produtos a preços competitivos. Na contemporaneidade, a infraestrutura hidroviária da região é constituída por várias vias em corrente livre e por trechos de rios canalizados.

### 3.3 CARACTERÍSTICAS GERAIS

A hidrovia do Tapajós-Teles Pires abrange os estados do Amazonas, Rondônia, Pará e Mato Grosso, estão inseridas 96 municípios no decorrer da sua extensão, sendo o Teles Pires o divisor natural dos estados de Mato Grosso e Pará. Essa hidrovia possui três segmentos navegáveis, praticamente isolados entre si.

O trecho considerado para esta pesquisa é conhecido como Baixo Tapajós, correspondente ao segmento entre Santarém e Itaituba (PA) é francamente navegável, sem grandes dificuldades o ano todo. Esse segmento possui profundidades mínimas de 2,5 metros e declividade média de 4cm/km, apresentando grandes números de ilhas fluviais.

A hidrovia do Tapajós detém baixas taxas de transporte de sedimentos, ocasionando uma aparência cristalina as águas e sucedendo poucos bancos de areias. A hidrovia Teles Pires possui o fundo arenoso, com poucos ou nenhum obstáculo aos comboios fluviais. No entanto, é importante expor que no período de estiagem emergem diversos bancos de areia nos leitos da hidrovia.

A vazão média do rio Tapajós é algo em torno de 9.000m<sup>3</sup>/s. No Rio Teles – Pires, a vazão média, próximo a sua foz, é de cerca de 3.700 m<sup>3</sup>/s. Quanto ao período de enchentes no rio

Tapajós, este ocorre entre os meses de janeiro e maio e o comportamento hidrológico é bastante homogêneo ao longo do traçado do rio, uma vez que, com exceção do rio Jamanxim, não há afluentes de importância ao longo do rio. No rio Teles Pires o período de cheias ocorre entre dezembro e maio e o comportamento hidrológico é bastante homogêneo ao longo do traçado do rio.

A hidrovia é planejada para abranger praticamente todo o comprimento do rio, suportando a navegação de comboios com comprimento de 200 metros, 24 metros de boca, e calado mínimo de 1,50 metros, podendo alcançar até 2,50 metros na época das águas altas, com uma capacidade de carga de 7.500 toneladas por comboio.

Em relação a hidrovia do Amazonas, essa se situa na maior bacia hidrográfica do mundo, com uma área de drenagem de cerca de 7 milhões de km<sup>2</sup>. Da área total dessa bacia, 55% encontra-se situada nos estados do Acre, Amazonas, Amapá, Mato Grosso, Pará, Roraima e Rondônia, atravessando 29 municípios entre os estados do Amazonas, Amapá e Pará.

De acordo com Mello e Barros (2001), o período de enchente da hidrovia do Amazonas acontece entre os meses de fevereiro e junho e o período de vazante entre julho e outubro. A vazão média, na estação Óbidos (PA), é de cerca de 170.000 m<sup>3</sup>/s e a sua largura média é de aproximadamente 5 km. com profundidades mínimas da ordem de 30 metros.

Pequenas cargas e passageiros se deslocam para localidades ribeirinhas e grandes volumes são transportados através do transporte aquaviário. A hidrovia é tomada por embarcações de recreio, ribeirinhas, de turismo e lazer, balsas de cargas, balsas de derivados do petróleo, navios mercantes e navios graneleiros. Ao longo da hidrovia, são mais de 70 terminais e portos, pelos quais são transportados produtos regionais.

A Tabela 5 apresenta as características gerais de ambas as hidrovias.

**Tabela 5** - Características gerais das hidrovias do estudo

<b>HIDROVIA</b>	<b>TAPAJÓS-TELES PIRES</b>	<b>AMAZONAS</b>
Extensão navegável	359 km	1646 km
Largura média	10 km	2 Km
Período de águas baixas	Agosto a Novembro	Junho a Outubro
Período de águas altas	Janeiro a Maio	Fevereiro a Junho

Fonte: DNIT adaptado

### 3.4 ROTA FLUVIAL MIRITITUBA-VILA DO CONDE

Em 2013, empresas privadas começavam a pôr em prática a criação de um sistema logístico novo, com a capacidade de escoamento de até 20 milhões de toneladas de grãos do estado do

Mato Grosso através da bacia Amazônica. Esse corredor insere uma rota para a exportação da soja e milho colhidos em municípios produtores do estado que são cortados pela BR- 163. Anteriormente a isso, 70% da safra do Mato Grosso era escoada para os portos de Santos (SP) e Paranaguá (PR), mais de 2 mil quilômetros da produção.

Grande parte dos recursos investidos nesse novo sistema logístico estão sendo investidos no município de Itaituba (PA), mais especificamente no distrito de Miritituba, situado às margens direita do rio Tapajós e nas vizinhanças do cruzamento entre as rodovias BR-163 e BR-230, cerca de 900 quilômetros da produção agrícola. A intenção é aumentar a capacidade de recepção da produção do médio-Norte do estado do Mato Grosso e distribuí-los através de comboios fluviais para os portos de Santarém (PA), Santana (AP) e Barcarena (PA).

O porto de Santarém gera uma série de conflitos com a dinâmica urbana, por se localizar em um perímetro urbano, o que restringe sua capacidade de ampliação. Já o porto de Miritituba, tem despertado grande interesse dos produtores e comerciantes de grãos, interessados em estabelecer terminais de recepção da carga transportada pela BR 163. Segundo Barros (2019), a utilização do trecho reduz os custos logísticos com fretes em cerca de 30% e o percurso terrestre em cerca de 1000 quilômetros.

Quase uma dúzia de empresas especializadas em transporte de cargas já tratou de comprar seus terrenos em Miritituba. Nessa lista estão companhias gigantescas, como as tradings americanas Bunge e Cargill, que tocam o processo de licenciamento ambiental de seus projetos e já começam a movimentar cargas. Operadores Logísticas como Hidrovias do Brasil, Cianport, Unirios e Terfron também já demarcaram seus territórios em Itaituba.

Nos terminais de Itaituba, a carga seria embarcada em comboios e transportada por meio da hidrovia do Tapajós e Amazonas até os Portos do Amapá e Pará. Vale ressaltar que o volume transportado por comboio seria o equivalente ao transportado por 800 caminhões. No entanto, é importante mencionar que essa rota depende exclusivamente da conclusão das obras de pavimentação da BR 163 e restauração da BR 155 e BR 158 e realização de intervenções de adequação de capacidade na BR 364 em Rondônia.

#### 4. ALTERNATIVAS DE SISTEMAS PROPULSIVOS

O objetivo deste capítulo é descrever as alternativas propulsivas que são utilizadas em comboios fluviais destinados ao transporte de grãos na região amazônica. As instalações utilizando geração de energia propulsiva Diesel-elétrica e Diesel mecânica, com arranjo convencional, azimutal ou passo controlável. Apresenta-se um levantamento das diversas aplicações em embarcações aquaviárias, com atenção especial às embarcações fluviais. São sintetizadas as características gerais de cada tipo de estação.

##### 4.1 PROPULSÃO COM HÉLICES DE PASSO FIXO

Conforme Geertsma et al. (2017), esse tipo de sistema é composto por um motor principal, usualmente um motor diesel ou, em poucas ocasiões, turbinas a gás; e um propulsor, ligado ao motor principal diretamente ou através de engrenagens.

Figura 9 - Hélice de passo fixo



De acordo com Carlton (2012), as hélices de passo fixo, tradicionalmente, formaram a base da produção de hélices ao longo dos anos em suas formas: Monobloco ou montado. Em vários aspectos, o hélice montado tem vantagens óbvias. No entanto, os hélices montados geralmente têm um raio de ressalto maior do que o seu homólogo de passo fixo e isso pode causar dificuldade com problemas de cavitação nas regiões da seção da raiz da lâmina em alguns casos. Desta forma, atualmente o hélice monobloco é utilizado majoritariamente, já o hélice montado, cujas pás são fundidas separadamente da saliência e aparafusadas após a usinagem, é raramente utilizado. Entretanto, nem sempre foi assim, já que na década de 2000 os hélices montados eram muito comuns, em parte devido à incapacidade de obter grandes peças fundidas com boas qualidades e também pelas dificuldades em definir o passo correto da lâmina.

Os hélices monoblocos abrangem uma ampla diversidade de tipos e tamanhos de projeto, alternando entre aqueles que pesam apenas alguns quilos para uso em pequenos barcos a motor e aqueles, por exemplo, destinados a grandes navios porta-contêineres que podem pesar cerca de 130 toneladas e exigir a simultânea fundição de significativamente mais metal para produzir a fundição. Os materiais de fabricação também variam consideravelmente em uma ampla variedade de modelos e tamanhos. Para hélices com mais de 300 mm de diâmetro, predominam os materiais não ferrosos: o latão de alta resistência, juntamente com os bronzes de manganês e níquel-alumínio, são os tipos de materiais mais utilizados. O ferro fundido, que já foi o material favorito para a produção de hélices sobressalentes, agora praticamente não é utilizado para a fabricação. Como alternativa, em hélices menores, o uso é frequentemente feito de materiais como polímeros, alumínio, nylon e, mais recentemente, compósitos de fibra de carbono.

Esse tipo de propulsão utiliza motores à diesel, os quais são otimizados para operação em uma faixa de carga específica, geralmente de 70 a 100% de sua capacidade operacional (CARIOU, 2011; JAFARZADEH; SCHJØLBERG, 2018; SMITH et al., 2015). No entanto, os perfis operacionais das embarcações fluviais incluem diversas demandas de energia, decorrente da necessidade de manobras recorrentes (PAULIDES et al., 2016a).

Diferentemente de grandes navios de carga, navios menores como embarcações fluviais requerem uma caixa de engrenagens para reduzir a velocidade do motor, já que estes são movidos por motores de média ou alta velocidade. Essa caixa de engrenagens pode ser utilizada para reversão da rotação do eixo. Segundo GEERTSMA et al. (2017), o tipo de hélice mais utilizado neste sistema é o de passo fixo. Este tipo de sistema propulsivo necessita de uma caixa de engrenagens ou um motor reversível para parada ou reversão.

Para hélices de passo fixo, a escolha do número de pás, apesar das considerações de folgas de lâmina para lâmina na raiz da lâmina para uma interface de ressalto, é em grande parte uma variável independente e é normalmente escolhida para dar uma incompatibilidade à faixa de casco, superestrutura e frequências de vibração de máquinas consideradas suscetíveis de causar preocupação. Além disso, o número da lâmina também é um parâmetro útil no controle de características indesejáveis da cavitação. Os números de lâminas geralmente variam de dois a sete, embora em algumas aplicações navais, onde considerações sobre ruído irradiado se tornem importantes, números de lâminas maiores que esses tenham sido pesquisados e usados para resolver uma variedade de problemas de propulsão. Para embarcações mercantes, no entanto,

quatro, cinco e seis pás são geralmente favorecidas, embora muitos rebocadores e embarcações de pesca usem frequentemente projetos de três pás. No caso de pequenos barcos a motor, para trabalho ou lazer, as hélices de duas e três pás tendem a predominar.

Segundo Hochkirch e Bertram (2010), os hélices de passo fixo são mais baratos e têm uma eficiência melhor do que hélices de passo controlável (CPPs), para um determinado ponto operacional. Eles podem ser substituídos caso o operador decidir operar o navio a longo prazo e velocidades menores. Hélices de passo fixo são o elemento propulsor mais simples, sendo os mais empregados atualmente (devido a simplicidade, custo de aquisição e manutenção) e tendo como única forma de alterar o empuxo sendo através da rotação, o que, eventualmente, compromete a eficiência.

Dados estes fatores, eles são utilizados principalmente em navios comerciais que operam na maior parte de sua vida em velocidade de cruzeiro.

Hélice de passo fixo: as pás deste tipo de hélice estão fixas no cubo do hélice. As fixações das pás no cubo podem ser feitas separadamente na fundição ou podem ser parte de um único bloco de fundição. Em geral a razão diâmetro do cubo pelo diâmetro do hélice está dentro da faixa de 0,18 a 0,20;

#### 4.2 PROPULSÃO COM HÉLICES DE PASSO CONTROLÁVEL

O hélice de passo controlável é próprio para variar a velocidade de operação da embarcação. O empuxo é obtido alterando-se o passo e/ou a rotação do hélice, tendo-se como vantagens: menor arrasto dependendo da velocidade utilizada, poder mover o navio para trás (revertendo o passo), e poder recolher o propulsor quando não está sendo utilizado (o que diminui a resistência da água), sendo utilizado quando se necessita alta manobrabilidade; o motor não permite reversão da rotação; há duas velocidades distintas de operação; e/ou necessita-se de empuxos diferentes. Este tipo de propulsor é utilizado em balsas, dragas, navios de cruzeiro, rebocadores e navios de carga que não contam com rebocadores.

De acordo com Bhattacharyya, Krasilnikov e Steen (2016), o hélice de passo controlável fornece um grau extra de liberdade em sua capacidade de alterar o passo da lâmina, ao contrário dos hélices de passo fixo., cuja única variável operacional é a velocidade de rotação. No entanto, em algumas aplicações particulares de propulsão, especialmente aquelas que envolvem geradores acionados por eixo, a velocidade do eixo é mantida quase sempre constante, reduzindo o número de variáveis operacionais para uma: O passo do hélice. Embora esse último

arranjo seja conveniente para a geração de energia elétrica, ele pode causar dificuldades em termos das características de cavitação da hélice ao induzir cavitação nas costas e na face em diferentes condições de propulsão.

Figura 10 - Hélice de passo controlável



Os hélices de passo variável podem ser utilizados como forma de superar os entraves causados pela dificuldade de inversão dos sistemas que utilizam hélices de passo fixo. Isto porque esse tipo de propulsor adiciona um grau superior de controle do passo (WOUD; STAPERSMA, 2002a). A redução do passo reduz a tração da hélice e a potência absorvida pelo motor em determinada velocidade do eixo, permitindo que a tração seja reduzida abaixo do valor da velocidade mínima do motor e do passo total. Ademais, a reversibilidade do passo permite que a tração seja suspensa ou invertida sem que haja inversão do motor ou da caixa de câmbio. O hélice de passo variável afeta positivamente a manobrabilidade da embarcação assim como seu desempenho.

O hélice de passo controlável, embora requeira um grau de complexidade maior que a alternativa de passo fixo, possui diversas vantagens estratégicas. A manobrabilidade, por exemplo, é uma dessas vantagens, pois o controle do empuxo pode ser alcançado sem a necessidade de acelerar e desacelerar as máquinas de propulsão (SHIGUNOV, 2019). O controle do empuxo é particularmente importante em certos casos, como em situações de posicionamento dinâmico ou onde são necessárias manobras de atracação frequentes (GAGGERO et al., 2019). Além disso, o design básico do cubo da hélice de passo controlável pode, em muitos casos, ser modificado para acomodar o embaçamento das pás da hélice. Tal fator encontra aplicações em balsas ou em pequenos navios de guerra.

É suficiente dizer, portanto, que cada fabricante possui um projeto individual do mecanismo de variação do passo, mas que esses projetos podem ser amplamente agrupados em dois tipos principais; aqueles com interno e aqueles com atuação hidráulica externa.

#### 4.3 PROPULSORES COM HÉLICES AZIMUTAIS

Os propulsores azimutais são integrantes de um sistema combinado de propulsão e comando que converte a potência do motor em impulso otimizado, além de possibilitar sua utilização nas manobras e no posicionamento dinâmico do navio, uma vez que seus componentes submersos podem ser direcionados ao longo de 360° (CARLTON, 2012). Esses tipos de propulsores são capazes de fornecer impulsos a embarcação em qualquer azimute.

Figura 11 - Propulsão azimutal



Esses propulsores podem ser retráteis, rebatíveis, ou fixos quando utilizados para propulsão. A máquina motriz fica dentro da embarcação. Pode ser um motor elétrico alimentado por gerador ou um motor diesel. O hélice pode ter tanto passo variável com acionamento hidráulico como fixo controlado por inversor de frequência. Neste caso, a máquina motriz será obrigatoriamente um motor elétrico. Esse tipo de propulsão é mais simples e mais comum em pequenas embarcações e são de uso comum há muitos anos e podem ter arranjos de hélices sem ou com dutos.

Quanto à transmissão de potência a à localização do motor, podem ser classificados em 2 tipos:

-Transmissão mecânica (CARLTON, 2012): O hélice é conectado a um motor elétrico ou a diesel que fica no interior da embarcação através de eixos e caixas de engrenagem. O sistema

é denominado Z-drive o motor encontra-se na horizontal (mais fácil de manipular e fazer manutenção) e há duas caixas de engrenagens. O sistema é denominado L-drive quando o motor se encontra instalado verticalmente e existe apenas uma caixa de engrenagens (menos perdas energéticas).

-Transmissão elétrica (NYLUND, 2016): O hélice é conectado diretamente a um motor elétrico, sem a necessidade de engrenagens. O motor fica localizado em um “casulo” junto ao hélice fora do casco da embarcação. A energia elétrica é gerada a bordo por um grupo de geradores diesel ou uma turbina a gás. A empresa precursora desta tecnologia foi a ABB, que patenteou o seu produto com o nome de Azipod.

O Azipod possui inúmeras vantagens em relação à propulsão convencional, entretanto, essas vantagens se aplicam à grandes embarcações, com poucas informações disponíveis para a aplicação em embarcações menores, como as fluviais. As vantagens significativas que este sistema pode trazer incluem:

1. Redução do espaço ocupado pelo maquinário;
2. Aumento considerável na capacidade de manobra em águas rasas e restritas;
3. Redução da distância de parada brusca e distância de manobra de giro.

No caso da hidrovia do Tapajós, um sistema de manobra mais eficiente tende a reduzir significativamente o número de ocorrência de sinistros. Além disso, este tipo de propulsão pode ajudar as embarcações a realizar manobras em condições difíceis e mau tempo, já que a região é tomada pelas intensas chuvas tropicais, o que pode aumentar a probabilidade de ocorrência de sinistros.

Conforme Paulides et al. (2016), as principais vantagens desse tipo de propulsão são: Flexibilidade (melhor utilização do espaço), maior economia de operação, menos manutenções e danos ambientais reduzidos. Conforme Carlton (2012), esse tipo de propulsão possui vantagens significativas no quesito manobrabilidade apesar de possuir forte tendência a exibir fortes excitações, aumentando significativamente a taxa de frequência das manutenções relativas a cavitações.

#### 4.4 CARACTERÍSTICAS DOS TIPOS DE HÉLICES NA PROPULSÃO

A Tabela 6 informa a condensação dos itens 4.1, 4.2 e 4.3 desta dissertação; expondo as principais particularidades dos tipos de propulsão utilizados nesta pesquisa.

**Tabela 6** - Importantes características dos tipos de hélice

<b>TIPO DE HÉLICE</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
<b>Hélices de passo fixo</b>	Fácil manufaturamento
	Velocidade de rotação dependente da potência absorvida
	Sem restrição na área ou formato da lâmina
	Baixa complexidade mecânica
<b>Hélices de passo controlável</b>	Capacidade de acomodação de múltiplas condições de operação
	Velocidade nominal constante ou variável
	Restrição na área da lâmina para manutenção da reversibilidade da mesma
	Maior complexidade mecânica
<b>Hélices azimutais</b>	Excelente controle direcional de impulso
	Maior complexidade mecânica
	Podem ser com ou sem dutos
	Hélices podem ser de passo fixo ou controlável

**Fonte:** CARLTON (2012) Adaptado

#### 4.5 INSTALAÇÃO DIESEL

Após a realização de um levantamento, verificou-se diferentes alternativas de sistemas propulsivos utilizados no transporte fluvial realizado na região amazônica e na região Sul do Brasil, dependendo do tipo de hélice e tipo de geração de energia. Uma dessas alternativas de sistemas propulsores típicas utilizadas nessas embarcações é a propulsão Diesel mecânica. Conforme Geertsma et al. (2017a), esse sistema é composto por um motor principal, usualmente um motor diesel ou, em poucas ocasiões, turbinas a gás; e um propulsor, ligado ao motor principal diretamente ou através de engrenagens.

A instalação Diesel convencional é consistida em 1 ou mais eixos de propulsão, acionada por um motor à Diesel cada (no caso de haver mais de um eixo propulsivo), ambas acopladas a um hélice de passo fixo através de caixas redutoras ou reversores (Figura 12). Além da instalação convencional, serão utilizadas para esse estudo as instalações que envolvem a utilização de hélices azimutais e passo variável.

A determinação do custo dessas instalações foi definida através de uma pesquisa de mercado. Quanto aos custos de mão-de-obra de instalação e manutenção desses sistemas, considerou-se o trabalho de (GARCIA, 2001). Ao longo dos anos, entretanto, foi observado

uma variação de acordo com o mercado dos dados de preços apresentados nesse estudo, portanto, realizou-se uma atualização através de correção monetária da tabela de preços.



Fonte: Autor (2021).

Os sistemas de motores podem ser de dois tipos: dois tempos e quatro tempos, havendo significativas diferenças entre eles no que tange ao seu funcionamento, componentes e dentre outros fatores. Inicialmente, antes de adentrar no funcionamento dos motores de 2 e 4 tempos, faz-se necessário descrever a diferença entre estes motores, destacando-se como a principal a rapidez com que esse processo de ciclo de combustão ocorre, com base no número de vezes que o pistão se move para cima e para baixo durante cada ciclo. No que diz respeito à eficiência, o de 4 tempos certamente vence, haja vista que o combustível é consumido uma vez a cada 4 cursos. Os motores de quatro tempos são mais pesados; pesam mais de 50% a mais do que um motor de 2 tempos comparável, além de que estes também são muito mais silenciosos, sendo o motor de 2 tempos significativamente mais ruidoso, tendo um som de “zumbido” distinto e agudo.

#### **i. MOTOR DE 4 TEMPOS**

No que tange ao funcionamento do motor de 4 tempos, destaca-se que este é um ciclo realizado em quatro tempos de pistão distintos (admissão, compressão, potência e escape) para completar um ciclo operacional, sendo o ciclo equivalente a duas voltas (720°) do virabrequim. Em um motor de 4 tempos, o pistão completa 2 tempos durante cada revolução: um curso de compressão e um curso de escape, cada um seguido por um curso de retorno. As velas de ignição disparam apenas uma vez a cada duas revoluções e a potência é produzida a cada 4 tempos do pistão. Esses motores também não requerem pré-mistura de combustível e óleo, pois possuem um compartimento separado para o óleo. As etapas de funcionamento são:

- **Admissão:** Trata-se do processo de quando a mistura ar-combustível é introduzida para encher a câmara de combustão. O evento de admissão ocorre quando o pistão se move e a válvula de admissão está aberta. O movimento do pistão cria uma baixa pressão no cilindro e a pressão atmosférica ambiente, eventualmente, força a mistura de ar-

combustível através da válvula de admissão aberta no cilindro para preencher a área de baixa pressão criada pelo movimento do pistão. O cilindro continua a encher à medida que a mistura ar-combustível continua a fluir por sua própria inércia, enquanto o pistão começa a mudar de direção. A válvula de admissão permanece aberta alguns graus de rotação do virabrequim e, então, se fecha e a mistura ar-combustível é selada dentro do cilindro.

- **Curso de compressão:** O processo de compressão acontece quando a mistura ar-combustível presa é comprimida dentro do cilindro. A câmara de combustão é selada para formar a carga (que é o volume da mistura de ar comprimido com combustível aprisionada dentro da câmara de combustão pronta para a ignição). A compressão da mistura ar-combustível permite que mais energia seja liberada quando a carga é acesa. As válvulas de admissão e escape, então, se fecham para garantir que o cilindro seja vedado para fornecer compressão, sendo este o processo de redução ou compressão de uma carga de um volume grande para um volume menor na câmara de combustão, tendo auxílio do volante para manter o momento necessário para comprimir a carga.
- **Evento de ignição:** No que tange ao evento de ignição (combustão), tem-se que este ocorre quando a carga é inflamada e rapidamente oxidada por meio de uma reação química para liberar energia térmica, sendo a combustão a reação química oxidante rápida na qual um combustível se combina quimicamente com o oxigênio da atmosfera e libera energia na forma de calor. O oxigênio atmosférico e o vapor de combustível são consumidos por uma frente de chama progressiva, que progride através da câmara de combustão até que toda a carga seja queimada.
- **Curso de Potência:** O curso de potência é um curso de operação do motor no qual gases quentes em expansão forçam a cabeça do pistão para longe da cabeça do cilindro. A força do pistão e o movimento subsequente são transferidos através da biela para aplicar o torque ao virabrequim. O torque aplicado inicia a rotação do virabrequim. A quantidade de torque produzida é determinada pela pressão no pistão, pelo tamanho do pistão e pelo movimento do motor. Durante o curso de energia, ambas as válvulas estão fechadas.
- **Exaustão:** O golpe de exaustão ocorre quando os gases gastos são expelidos da câmara de combustão e liberados para a atmosfera. O curso de escape é o curso final e ocorre quando a válvula de escape está aberta e a válvula de admissão é fechada. O movimento do pistão evacua os gases de exaustão para a atmosfera. Quando o pistão atinge o BDC

(ponto morto inferior) durante o curso de força, a combustão é concluída e o cilindro é preenchido com gases de exaustão. No final do curso de exaustão, o pistão está em TDC (ponto morto superior) e um ciclo de operação foi concluído.

▪

## ii. MOTOR DE 2 TEMPOS

Como o nome indica, o motor de dois tempos requer apenas dois movimentos de pistão (um ciclo) para gerar energia. O motor é capaz de produzir potência após um ciclo porque a exaustão e a admissão do gás ocorrem simultaneamente. Há uma válvula para o curso de admissão que abre e fecha devido às mudanças nas pressões. Além disso, devido ao seu contato frequente com componentes móveis, o combustível é misturado ao óleo para adicionar lubrificação, permitindo cursos mais suaves.

Em um motor de 2 tempos, todo o ciclo de combustão é completado com apenas um curso de pistão: um curso de compressão seguido pela explosão do combustível comprimido. Durante o curso de retorno, o escapamento é liberado e uma nova mistura de combustível entra no cilindro. As velas de ignição disparam uma vez a cada revolução e a potência é produzida uma vez a cada 2 golpes do pistão. Os motores de dois tempos também exigem que o óleo seja pré-misturado ao combustível. No geral, um motor de dois tempos contém dois processos:

- **Curso de compressão:** A porta de entrada se abre, a mistura ar- combustível entra na câmara e o pistão se move para cima, comprimindo essa mistura. Uma vela de ignição acende o combustível comprimido e dá início ao curso de força.
- **Curso de potência:** O gás aquecido exerce alta pressão no pistão, o pistão se move para baixo (expansão), o calor residual é exaurido.

## 4.6 INSTALAÇÃO DIESEL-ELÉTRICA

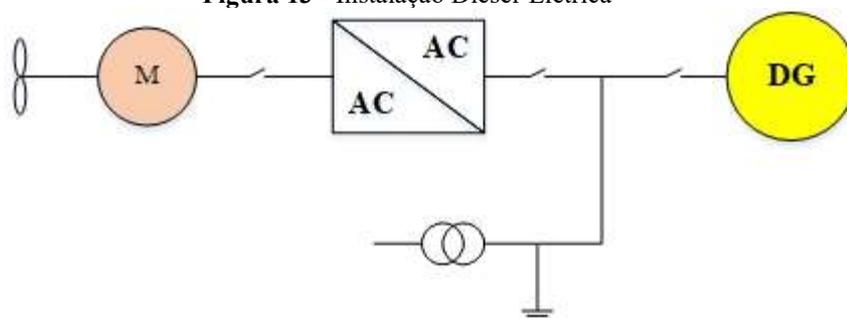
A principal desvantagem de um conjunto gerador baseado em motores de combustão é uma baixa taxa de eficiência devido às múltiplas conversões de energia. Uma maneira de aumentar a relação custo x benefício do sistema em geral é usando um motor de combustão de frequência de rotação variável (CHEN; ZHAO; XIAO, 2019; SOLEM et al., 2015; XIAO et al., 2016). A principal vantagem da propulsão diesel-elétrica é o ajuste de velocidade da hélice

independentemente da rotação do motor diesel. O ajuste da rotação do propulsor é determinado pela velocidade do motor elétrico. Assim, a motor principal trabalha em uma velocidade constante movimentando um gerador que fornece a energia ao motor elétrico. O controle de velocidade do motor elétrico pode ser realizado através do inversor de frequência aplicado ao motor.

Outra característica do sistema diesel-elétrico é o alto torque em baixas velocidades e sistemas de transmissão mais suave, bastante utilizados por navios quebra-gelo (KHAVATOV; DAR'ENKOV, 2016; NUCHTUREE; LI; XIA, 2020). Em relação a manutenção, a propulsão elétrica apresenta menores custos se comparado com o sistema diesel-mecânico. Em relação ao aspecto técnico, a propulsão elétrica oferece vantagens em termos de manobrabilidade, controles automáticos, maior capacidade de reversão dos motores, dispensa caixa de engrenagens, pouco ruído e vibração no eixo do propulsor. Em estudos recentes com navios diesel-elétricos maiores, demonstraram uma redução de 30% a 50% na parada de colisão em relação à propulsão convencional. Em geral, um navio com esse tipo de sistema de propulsão tem um diâmetro táctico 40% menor do que um navio com propulsão convencional (PAPALAMBROU et al., 2017; ZHOU; PAZOUKI; NORMAN, 2021).

Nesse sentido, a utilização de instalações Diesel-elétrica em diversos tipos de embarcações é cada vez mais popular, graças a sua capacidade de redução do consumo de combustível, ruídos e vibrações, baixo custo de manutenção, alta eficiência e amplo controle de velocidade (CHAI et al., 2016a). Para este trabalho, foi definido uma instalação composta por 1 grupo diesel-gerador 20 Genset Wartsilla 4L20, 1 barramento para distribuição de energia com tensão de 444 V, 1 motor elétrico assíncrono, acionado por um tipo de hélice azimutal (Figura 13). O sistema de governo utilizado é o mesmo das instalações Diesel.

**Figura 13 - Instalação Diesel-Elétrica**



**Fonte:** Autor (2021).

O motor elétrico utilizado para esta dissertação é do assíncrono, pelas seguintes vantagens em relação ao motor síncrono (SENS, 2001): Custo de aquisição menor, facilidade de

manutenção e facilidade de assistência técnica e reposição de peças. Foi considerado também o tamanho do motor: O motor síncrono apresenta maior peso e volume em relação ao assíncrono.

Foi considerado o sistema Diesel-gerador com uma margem de potência 15% maior que para o grupo Diesel, por admitir que o grupo diesel-gerador trata tanto da propulsão quanto no maquinário auxiliar. Este fator é uma recomendação do fabricante do gerador, como também de diversos estudiosos, para garantia do fornecimento de energia e segurança em condições extremas.

## 5. METODOLOGIA

Um sistema propulsivo ideal para a rota Miritituba-Vila do Conde é o que atende perfeitamente os critérios de seleção indicados. Todavia, é notável que nenhum sistema propulsor apresenta todas as vantagens reunidas, em vista disso, um critério de decisão para consumação da seleção é investigado.

Atualmente, na maioria dos casos, a decisão sobre o sistema propulsivo dos comboios fluviais utilizados no Brasil tem como critério de seleção, quase que exclusivamente, o menor custo de aquisição e/ou menor custo operacional. Entretanto, como exposto no decorrer desta dissertação, é necessário incluir outros critérios, e até alterar a importância dos critérios mencionados, para uma avaliação mais consistente das alternativas expostas. Tal prática já é habitual em projetos de engenharia.

Os critérios utilizados como “influenciadores da seleção” do sistema propulsivo ideal serão obtidos através da aplicação de questionários e de acordo com investigação em trabalhos acadêmicos. Posteriormente, os critérios encontrados serão classificados por um sistema de notas através do sistema Likert, que consiste em pontuar os critérios em uma escala de 1 a 5 pelos entrevistados, sendo 5 o maior impacto na seleção de um sistema propulsivo e 1 o menor impacto (HARPE, 2015; LI, 2013; WADGAVE; KHAIRNAR, 2016).

Pretende-se selecionar a melhor dentre 4 alternativas para o sistema propulsivo de um empurrador, levando em consideração critérios influenciadores posteriormente analisados e estabelecidos. Portanto, este problema deve ser tratado como uma “otimização de certo sistema sob diversos critérios”. Para este contexto, há vários métodos de auxílio a tomada de decisão. Entre eles podem ser mencionados os métodos AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e Promethee (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*). Nesta dissertação serão utilizados ambos os métodos de forma integrada para avaliação da melhor alternativa de sistema propulsivo para o comboio fluvial.

### 5.1 DESENVOLVIMENTO E ESTRUTURAÇÃO METODOLÓGICA

Conforme mencionado no tópico supracitado, a pesquisa em questão trata-se de estudo qualitativo e quantitativo de análise de eficiências relativas aplicado à navegação fluvial amazônica. Após a obtenção e tratamento dos dados, foi-se aplicado o método proposto nas alternativas de sistemas propulsivos para comboios fluviais que transportam grãos pela rota Miritituba – Vila do Conde, a fim de melhor avaliar os resultados da abordagem multicritério.

**Tabela 7 - Métodos MCDM, suas aplicações, forças e fraquezas**

<b>MÉTODO</b>	<b>ÁREA DE APLICAÇÃO</b>	<b>FORÇAS</b>	<b>FRAQUEZAS</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>
<b>AHP</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gerenciamento de recursos</li> <li>• Políticas e estratégias</li> <li>• Políticas públicas</li> <li>• Planejamento energético</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adaptabilidade</li> <li>• Não envolve cálculos complexos</li> <li>• Baseado em estruturas hierárquicas, transparecendo e focando melhor os critérios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Independência entre objetivos e alternativas levam à resultados perigosos</li> <li>• Quanto maior o número de tomadores de decisão, mais complicado de obtenção dos pesos</li> <li>• Demanda coleta de dados baseada em experiências</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ISHIZAKA e LABIB (2011)</li> <li>• SHAHROODI et al. (2012)</li> </ul>
<b>ELECTRE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gerenciamento de energia</li> <li>• Gerenciamento financeiro</li> <li>• Gerenciamento de negócios</li> <li>• Tecnologia da informação</li> <li>• Logística e Engenharia de transporte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Envolve tipos quantitativos e qualitativos de critérios ao mesmo tempo</li> <li>• Os resultados finais são validados com razões</li> <li>• Envolve escalas heterogêneas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menos versátil</li> <li>• Demanda excelente compreensão do objetivo quando essa lida com critérios quantitativos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• GOVINDAN e JEPSEN (2016)</li> <li>• FIGUEIRA et al. (2013)</li> <li>• SILAS, RAJSINGH e EZRA (2012)</li> </ul>
<b>TOPSIS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Logística</li> <li>• Gerenciamento de recursos hídricos</li> <li>• Gerenciamento de energia</li> <li>• Engenharia química</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trabalha com classificação fundamental</li> <li>• Utiliza informação alocada</li> <li>• As informações não necessitam ser independentes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não considera diferença entre valores positivos e negativos</li> <li>• Os valores dos atributos podem ser aumentados ou diminuídos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HSIEH et al. (2018)</li> <li>• AWASTHI, CHAUHAN e OMRANI (2011)</li> <li>• ZHANG et al. (2011)</li> </ul>
<b>VIKOR</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Engenharia mecânica</li> <li>• Políticas de energia</li> <li>• Gerenciamento de negócios</li> <li>• Medicina e saúde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calcula razão de solução de ideais positivos e negativos, removendo o impacto dos mesmos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificuldade quando há situações conflitantes</li> <li>• Precisa de modificação ao lidar com alguns dados concisos, uma vez que se tornam difíceis de modelar um modelo de tempo real.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• GUL et al. (2016)</li> <li>• LIU et al. (2013)</li> <li>• LIAO, XU e ZENG (2015)</li> </ul>
<b>PROMETHEE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análise de riscos</li> <li>• Análise estrutural</li> <li>• Engenharia de minas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Envolve decisões em níveis do grupo</li> <li>• Lida com informação qualitativa e quantitativa</li> <li>• Incorpora informações incertas e nebulosas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não estrutura o objetivo propriamente</li> <li>• Depende do decisor decidir os pesos</li> <li>• Complicado e número limitado de especialistas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• BEHZADIAN et al. (2010)</li> </ul>
<b>MAUT</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planejamento urbano</li> <li>• Política econômicas</li> <li>• Políticas governamentais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• É responsável por qualquer diferença em qualquer critério</li> <li>• Computa preferencias ordinárias para todas as alternativas</li> <li>• Atualiza as mudanças de qualquer impacto automaticamente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificuldade em ter inputs precisos</li> <li>• Resultado dos critérios de decisão são imprecisos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ADALI e IŞIK (2017)</li> <li>• SARUL e EREN (2016)</li> </ul>

Fonte: KUMAR et al. (2017)

Para a proposta de método de seleção de sistema propulsivo, aplicação com estudo de caso em embarcações tipicamente construídas na região e análise de preferência dos atores envolvidos, foi desenvolvido um modelo utilizando o processo de decisão multicritério (MCDM).

Para a seleção do melhor método, à luz da natureza e características do problema abordado, foram levados em consideração diversos fatores, inclusive trabalhos correlatos aplicando os diversos métodos estudados. Dessa forma, no que tange às características do modelo para seleção do método mais adequado à situação, diversos fatores foram levados em consideração, desde trabalhos correlatos à aplicação de métodos até qualidades impares a cada método.

No meio acadêmico e empresarial, os processos de tomada de decisão, por vezes, é uma atividade de alta complexidade. Desta forma, a análise de decisões multicritério emergiu como um instrumento de apoio às decisões. Esta é aplicada em análises comparativas de medidas heterogêneas ou alternativas de projetos, sendo estes fundamentais para negócios de sucesso em diferentes setores. Conforme Cho (2003), os métodos multicritérios lidam com a determinação da avaliação global de cada alternativa em potencial frente a uma decisão, sujeitando diversos critérios, tangíveis e intangíveis a esses candidatos. Estes métodos tem o objetivo de ajudar a integrar diferentes opções em suas ações, refletindo sobre as opiniões de diferentes sujeitos envolvidos no quadro da pesquisa em questão.

Para Sitorus, Cilliers e Brito-parada (2019), a abordagem por meio de métodos MCDM apresenta-se como ferramenta auxiliar na solução de situações herméticas, que devem atender um número demasiado de critérios de comparação e possíveis alternativas comparadas através desses critérios. De acordo com Shahsavari e Khomehchi (2018), esses métodos podem ser utilizados sob certezas e incertezas, ou seja, sob subjetividades, o que facilita a incorporação de análises quantitativas e qualitativas de forma integrada e científica.

De acordo com Mulliner, Malys e Maliene (2016), por definição, os métodos MCDM lidam com a avaliação de um conjunto de alternativas em termos de vários critérios, por vezes conflitantes. O objetivo direto desses métodos é fornecer uma escolha, classificação e/ou comparação de diversas alternativas, geralmente ordenando das mais preferidas às menos preferidas (LIOU; TZENG, 2012; ZAVADSKAS; TURSKIS, 2011). Em todos os métodos MCDM há 3 estágios que devem ser seguidos ordenadamente para correta aplicação dos mesmos (MULLINER; MALYS; MALIENE, 2016):

1. Determinar as alternativas e critérios relevantes para a seleção;

2. Anexar medidas numéricas relativas para os critérios e também para os impactos de cada alternativa sobre esses critérios; e
3. Processar os valores numéricos obtidos para determinação de cada alternativa.

Com o advento da tecnologia de processamento de dados na contemporaneidade, vários softwares que auxiliam na tomada de decisão são utilizados. A Tabela 7 ilustra um breve resumo dos métodos de análise multicritério mais populares, mostrando as áreas de maior incidência de aplicação, juntamente com suas forças e fraquezas, respectivamente (KUMAR et al., 2017).

Baseado no estudo de diversas pesquisas no âmbito internacional, é correto afirmar que uma grande quantidade de métodos de análise multicritérios vêm sendo desenvolvida através dos anos. Comumente, os métodos de análise multicritério mais utilizados em pesquisas e documentos científicos são métodos baseados em multiatributos, como o AHP, PROMETHEE e ELECTRE (BASURKO; MESBAHI, 2014; JEONG et al., 2018a; NIEKAMP et al., 2015).

## 5.2 ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

Um dos métodos de análise multicritério utilizados neste trabalho, o AHP, foi desenvolvido por Saaty (1977). Esse método reflete o que parece ser o funcionamento natural da mente humana agregando uma grande quantidade de elementos de uma situação complexa em grupos (SAATY, 2008), segundo propriedades comuns, onde diversos critérios ou variáveis são considerados para a seleção de diversas alternativas propostas, já que o método permite justificar a escolha de forma consistente e coerente (ŽAK; KRUSZYŃSKI, 2015).

O Analytic Hierarchy Process (AHP), desenvolvido na década de 1970 por Saaty (1980) é um dos mais utilizados do mundo tendo se provado com um alto nível de confiabilidade ao passar dos anos, tendo uma vasta bibliografia acerca do método (AHMAD ALINEJAD; PISHVAEE; BONYADI NAEINI, 2018a; BAFFOE, 2019a; HSU; LIOU, 2013).

O AHP é um método de análise multicritério que tem a potencialidade de analisar influências causais e seus efeitos, deduzindo os resultados e classificando-os. De acordo com Saaty (2008), a dedução de resultados pode ser realizada através de uma abordagem linear e fragmentada pela lógica dedutiva tradicional ou por meio de uma abordagem holística envolvendo todos os fatores e critérios definidos em uma hierarquia.

Segundo Wind e Saaty (1980), esse método permite a atuação incluindo todos os fatores importantes dentro de uma seleção, sendo estes tangíveis ou intangíveis, expressos

qualitativamente ou quantitativamente. Este método de decisão multicritério vem sendo utilizado em diversas áreas de conhecimento para resolver problemas de alta complexidade, sendo utilizado desde a área da saúde para identificar erros humanos importantes dentro de departamentos de emergência (HSIEH et al., 2018) e até mesmo para avaliação de risco para cadeia de suprimentos de fabricação de carrocerias de ônibus (BUTDEE; PHUANGSALEE, 2019). Dentro da área industrial, o método é comumente utilizada para análise de fornecedores e cadeias de fornecimento (DONG; COOPER, 2016), sendo altamente eficiente para tal fim.

Também foi utilizado o método PROMETHEE. Esse método possui seis variações com diferentes objetivos e características metodológicas (BRANS; VINCKE; MARESCHAL, 1986; PANDEY; KENGPOL, 1995; VINCKE, 1992). Esta pesquisa utilizou o PROMETHEE II, por resultar na ordenação das alternativas analisadas, reservando os primeiros lugares para os sistemas propulsivos com melhores desempenho e os últimos para os sistemas com piores desempenho à luz dos critérios propostos por esse trabalho.

O Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHE) foi desenvolvido na década de 80 por Brans (1982), e, segundo Behzadian et al. (2010), pode ser definido como um método de superação para que um conjunto finito de ações alternativas seja classificado e selecionado entre os critérios, que geralmente são conflitantes sendo também bastante simples na concepção e aplicação, comparado com os outros métodos para análise de critérios múltiplos.

O método PROMETHEE é um método de superação para um conjunto finito de alternativas ou ações a serem ranqueadas entre critérios, geralmente conflitantes entre si. Assim como o AHP, o PROMETHEE é um método de classificação de simples concepção e aplicabilidade em comparação a outros métodos MCDM (BRANS; VINCKE; MARESCHAL, 1986). Por consequência, o número de profissionais que aplicam o PROMETHEE em problemas práticos de decisão com múltiplos critérios, assim como pesquisadores que se interessam em aspectos de sensibilidades do método aumenta ano após ano. Assim, esse é um dos métodos MCDM mais utilizados atualmente (BEHZADIAN et al., 2010).

A família PROMETHEE de métodos de superação, incluindo a versão PROMETHEE I para classificação parcial das alternativas e PROMETHEE II para classificação completa das alternativas, foram desenvolvidos por Brans e apresentados pela primeira vez em 1982 em uma conferência na University Laval, Quebec, Canadá (BRANS, 1982).

Anos depois, várias versões dos métodos PROMETHEE, como o PROMETHEE III para classificação baseada em intervalo, o PROMETHEE IV para classificação completa ou parcial das alternativas quando o conjunto de soluções viáveis é contínuo, o PROMETHEE V para problemas com restrições de segmentação, foram desenvolvidos para ajudar em situações mais complexas de tomada de decisão.

As várias versões de PROMETHEE são aplicadas com sucesso em diversos campos e diversos pesquisadores o utilizaram em problemas que envolvem tomada de decisão. Esses métodos possuem alguns requisitos para um método apropriado com vários critérios e seu sucesso advém das suas propriedades matemáticas e sua facilidade de utilização.

A versão do método utilizada nesta dissertação é a PROMETHEE II, que, segundo Behzadian et al. (2010), é fundamental para a implementação das outras versões do método. O princípio básico dessa versão é baseado em comparação pareada de alternativas juntamente aos critérios de influência. As alternativas são avaliadas de acordo com diferentes critérios, que devem ser maximizados ou minimizados. A implementação do PROMETHEE II requer duas informações adicionais de importante menção: Determinação dos pesos e a função de preferência.

Quanto aos métodos ELECTRE, estes pertencem à família outranking (ROY; BOUYSSOU, 1993), uma das famílias clássicas de MCDM. Cada método consiste em duas fases: agregação e exploração. Na fase de agregação, dentro de um Multi-Criteria Aggregation Procedure (MCAP), os conceitos de concordância e não-discordância são usados para fazer comparações pareadas das alternativas, sendo as alternativas caracterizadas por seus desempenhos nos diferentes critérios (FIGUEIRA et al., 2013). De acordo com cada versão do ELECTRE, as operações diferem entre si tanto quanto aos problemas onde cada um pode ser utilizado (GOVINDAN; JEPSEN, 2016).

Tal qual os outros métodos apresentados, pesquisas com a finalidade de avaliar e classificar fornecedores foram realizadas utilizando o ELECTRE (COSTA; GOVINDAN; FIGUEIRA, 2018; GALO; CALACHE; CARPINETTI, 2018), os resultados mostraram que o método proposto é adequado e útil como uma ferramenta de auxílio à decisão para decisões de compra, permitindo que os gerentes obtenham conclusões robustas. Outrossim, pesquisas foram realizadas também com a finalidade de analisar e classificar alternativas (DUARTE NETO et al., 2017; JI; ZHANG; WANG, 2018), obtendo análises comparativas convincentes na solução de problemas com critérios compensatórios.

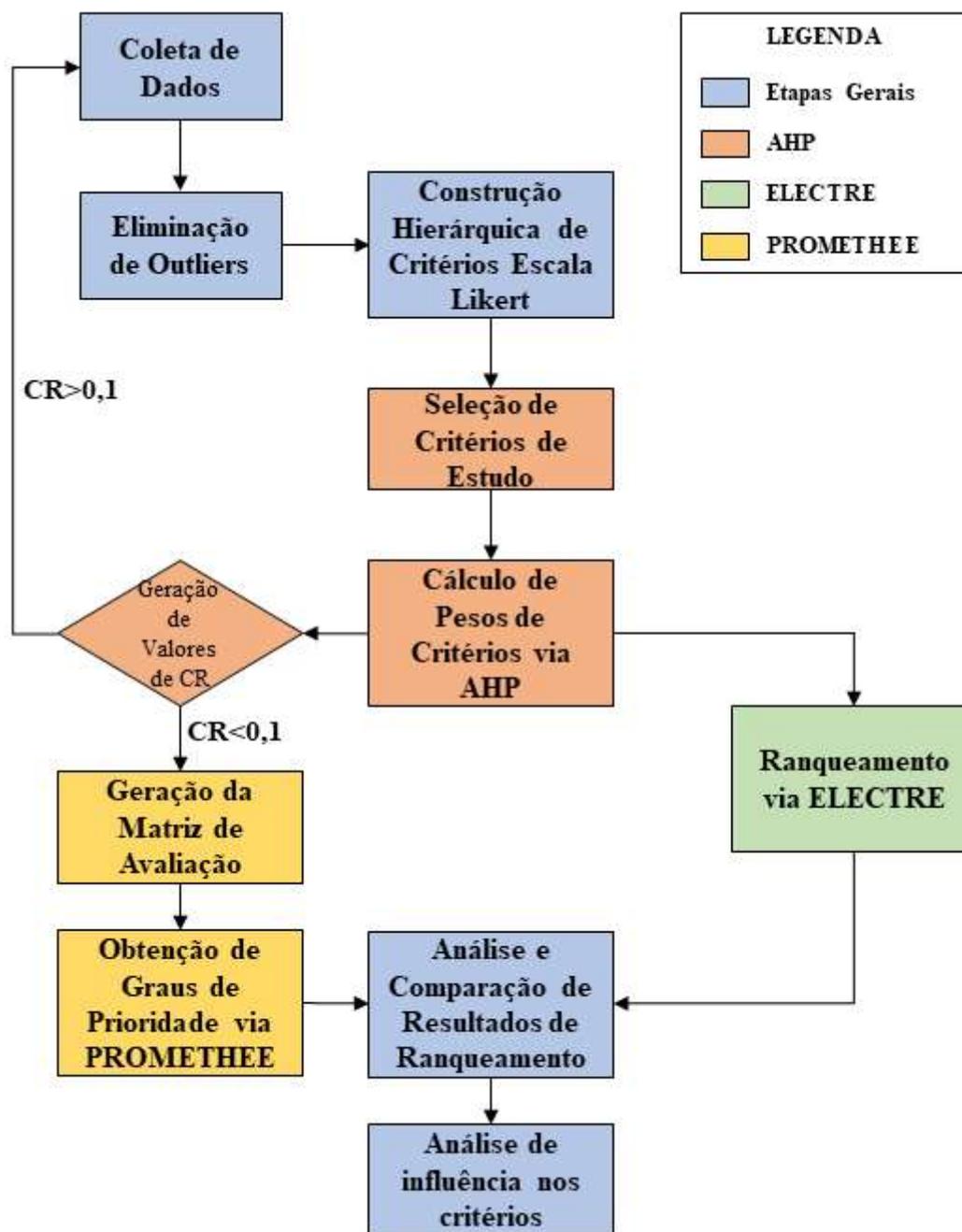
Assim como o método PROMETHEE, o método ELECTRE possui algumas variações. O primeiro método ELECTRE desenvolvido, ELECTRE I, foi desenvolvido para relatar os trabalhos de uma empresa de consultoria europeia (BENAYOUN; ROY; SUSSMAN, 1966). Mais tarde, no decorrer de duas décadas, foram desenvolvidas as outras variações do método: ELECTRE II (ROY; BERTIER, 1971), ELECTRE III (ROY, 1978), ELECTRE IV (ROY; HUGONNARD, 1982), ELECTRE TRI (ROY; BOUYSSOU, 1993; YU, 1992) e ELECTRE IS (ROY; BOUYSSOU, 1993). Com a finalidade de obter resultados sem a utilização da superação entre os critérios e demonstrar a sua influência ao resultado final da classificação das alternativas, foi utilizado o ELECTRE IV, por este não utilizar pesos ou superação de critérios no seu cálculo de classificação (ROY; HUGONNARD, 1982).

Após a avaliação de vantagens e desvantagens de métodos MCDM, explicitados na Tabela 7, foram selecionados os métodos AHP, PROMETHEE e ELECTRE. No caso do AHP, para cada elemento da hierarquia, um peso numérico é fornecido, permitindo que diversos critérios sejam comparados entre si de maneira consistente e racional.

Este estudo visa utilizar as vantagens de ambos os métodos, aplicando o AHP para construção da estrutura do problema e para determinação dos pesos. Para agregação dos critérios e classificação das alternativas o PROMETHEE foi utilizado.

A Figura 14 demonstra a abordagem proposta para essa pesquisa, AHP-PROMETHEE, que consistiu em 3 etapas: Coleta e análise de dados (1), obtenção de pesos para os critérios via AHP (2) e classificação das alternativas via PROMETHEE (3). O objetivo estabelecido a partir das metas desta dissertação foi de “operar o transporte de grãos através de comboios fluviais, variando entre sistemas propulsivos, da melhor forma possível”. Os pesos dentro das matrizes de cada decisão proposta e seus índices de consistência foram verificados, assim como proposto por Saaty (2008), para verificar a viabilidade da aplicação do método.

Figura 14 - Fluxograma da metodologia utilizada



Fonte: Autor (2021).

Para todas as alternativas foram obtidas respostas de 54 profissionais consultados no total. Na intenção de retirar os *outliers*, assim como, qualquer possível distorção na confiabilidade das respostas, será utilizado o método *bloxplot* (ver LI et al., 2016) nas comparações em pares individualmente para cada grupo. Já no caso das alternativas, serão utilizadas também as respostas, associadas aos dados técnicos já expostos nos itens anteriores.

Com o intuito de selecionar a melhor alternativa de sistema propulsivo, da melhor forma possível, dos sistemas de embarcações que trafegam tipicamente na rota Miritituba-Vila do Conde, as alternativas que buscarão atender o objetivo da melhor forma possível são as propostas no item 41 desta dissertação.

Uma estrutura hierárquica de 3 níveis foi construída, onde o segundo nível consiste em 5 critérios. Os critérios de decisão foram determinados através da revisão de literatura e da consulta de experts da área portuária no norte brasileiro, os quais também foram encarregados de realizar o processo de seleção das alternativas.

Nesse trabalho, o método AHP foi utilizado para definir os pesos dos critérios, devido a sua extensa utilização (SENNAROGLU; VARLIK CELEBI, 2018), alto nível de confiabilidade (AHMAD ALINEJAD; PISHVAEE; BONYADI NAEINI, 2018) e uso facilitado e intuitivo (DWEIRI et al., 2016; GHIMIRE; KIM, 2018). Segundo Sennaroglu e Varlik Celebi (2018), o AHP se enquadra na classe de métodos de ponderação subjetiva, devido aos julgamentos dos decisores, os quais as matrizes de comparação em pares são estabelecidas.

Os pesos dos critérios serão calculados de acordo com o procedimento apresentado por SAATY (1987), utilizando matrizes de comparação em pares dos critérios para cada alternativa desta pesquisa. As razões de consistência de cada matriz de comparação utilizadas deverão ser menores que 0,1; portanto aceitável, como proposto por Baffoe (2019) e Ghimire e Kim (2018). Na etapa de aplicação do método PROMETHEE, a matriz de avaliação foi construída. Os critérios relacionados à custos serão avaliados através das médias de valores reais de 3 estaleiros da região que produzem os mesmos tipos de embarcação do estaleiro, onde os piores valores foram estabelecidos com valor “1” e os melhores com valor “9” no *input* do AHP. A avaliação dos demais critérios são extremamente difíceis de serem computados, portanto suas avaliações são baseadas em revisões de literatura acadêmica e *brainstorm* dos questionados.

Posteriormente, uma função de preferência maximizada será selecionada e os valores dos parâmetros serão maximizados para todos os critérios a fim de calcular os graus de preferência associados às melhores alternativas para cada grupo de construção nos processos de comparação pareada (MARESCHAL; BRANS, 1994).

Após a determinação das matrizes de avaliação e das funções de preferência, as alternativas serão classificadas por meio do método proposto. Os fluxos positivos ( $\phi^+$ ) e negativos ( $\phi^-$ ); e o fluxo líquido ( $\phi$ ) obtidos da análise de cada grupo de construção serão exibidas tabelas de classificação final.

### 5.3 AVALIAÇÃO, CONCEITO E TIPOS DE QUESTIONÁRIOS

A abordagem desta pesquisa utiliza-se de dados subjetivos para solução do problema, podendo ser considerada uma pesquisa qualitativa para este tipo de evento, tal subjetividade dos dados é perceptível pela grande divergência das opiniões e respostas. A pesquisa qualitativa busca entender as diferentes maneiras pelo qual as pessoas experimentam eventos e processos de maneiras diversas, uma realidade construída através de múltiplas interpretações e filtrada através de um sistema de escolha. De acordo com Gibbs (2018):

“Os dados qualitativos são essencialmente significativos, mas, além disso, mostram grande diversidade. Eles não incluem contagens e medidas, mas incluem praticamente qualquer forma de comportamento de comunicação humana, simbolismo ou artefatos culturais.” (GIBBS, 2018)

A utilização de questionários com a finalidade de obtenção de dados é intensamente explorada por pesquisadores no momento atual, sendo que os tipos de estrutura dos questionários aplicados variam de acordo com os resultados desejados, métodos de análise dos dados e métodos de aplicação desses questionários.

Segundo McGuirk e O’neil (2016), os de questionários utilizam questões de vários tipos, sendo esses: Questões fechadas, questões combinadas e questões abertas. O tipo utilizado refere-se estritamente à abordagem utilizada, caso o pesquisador esteja simplesmente interessado em resolver certo problema, efetuar uma mudança ou identificar alternativas interessantes ao invés de posicionar um ponto.

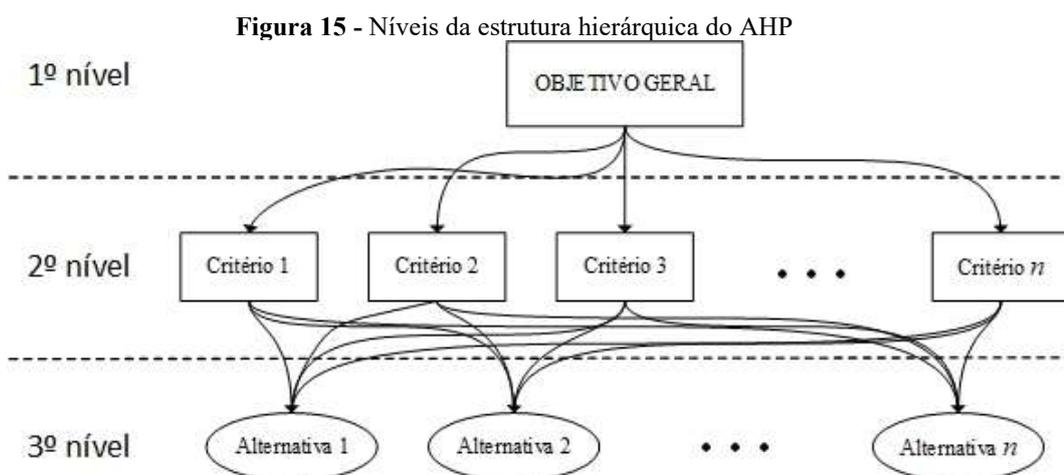
Segundo Lameira (2019), para que um questionário seja coerente e balanceado, a elaboração e aplicação do mesmo depende da imersão de, pelo menos, os seguintes itens:

- Balancear corretamente os aspectos de completude e relevância;
- Apresentar-se pequeno e de fácil preenchimento (é sugerido um máximo de 8 páginas no formato carta);
- Apresentar questões que os respondentes desejem e tenham condições de responder;
- Não divulgar o nome do interessado da pesquisa, a fim de evitar tendenciosidade nas respostas;
- Evitar títulos, tanto para o questionário quanto para os grupos de questões;
- Facilitar, por meio da pré-codificação das questões e respostas, o trabalho de digitação;
- Não sobrecarregar as páginas com excesso de questões, nem utilizar letras pequenas;
- Evitar ambiguidade no entendimento das questões;
- Ser pré-testado com indivíduos que poderiam vir a participar da pesquisa.

A adaptação do questionário para o método de análise a ser aplicado também é essencial. Neste caso, o prévio conhecimento e perícia no método e, também, dos pré-requisitos para elevação da confiabilidade das análises é fundamental.

#### 5.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO HÍBRIDO AO ESTUDO DE CASO

Segundo Macharis et al. (2004), O método AHP é baseado em 3 princípios: Construção hierárquica, estabelecimento de prioridades e consistência lógica. Primeiro, a estrutura hierárquica é utilizada para decompor o sistema complexo em seus elementos constituintes. A estrutura é construída em, pelo menos, 3 níveis (Figura 15): O objetivo geral ou intenção no topo; os critérios e subcritérios no nível intermediário e as alternativas consideradas na base (CHAND; THAKKAR; GHOSH, 2018; MACHARIS et al., 2004; SAATY, 2008). Após, as prioridades relativas de cada elemento na hierarquia são determinadas pela comparação de todos os elementos do nível inferior com os critérios, os quais deve-se existir uma correlação causal.



**Fonte:** SAATY (2008) adaptado

De acordo com Saaty (2008), as comparações em pares são baseadas em uma escala de comparação padronizada de 9 níveis (Tabela 8), onde os resultados são resumidos em matrizes de comparações em pares. Por último, a consistência das respostas dos tomadores de decisão, assim como da hierarquia sugerida, são analisadas através de uma razão de consistência (BENÍTEZ et al., 2012, 2018; KULAKOWSKI, 2015).

**Tabela 8** - Escala de comparação AHP

<b>Importância</b>	<b>Definição</b>
1	Igualdade de importância
3	Importância moderada
5	Maior importância
7	Muito mais importante
9	Completa dominância
2, 4, 6, 8	Valores intermediários
1/2, 1/3, 1/4, ... 1/9	Recíprocos

**Fonte:** SAATY (2008) adaptado

Então, serão feitas avaliações em pares para a classificação proposta, a qual se iniciará entre os critérios, indicando sempre “quão mais importante  $X$  é em relação à  $Y$ ”. Posteriormente, as alternativas também são comparadas em pares. As matrizes de comparação em pares são preenchidas então em de acordo com essas comparações, de acordo com as preferências dos decisores (SAATY, 1990; ŽAK; KRUSZYŃSKI, 2015). São apresentados exemplos de matrizes de comparação em pares em diferentes níveis de hierarquia nas Tabela 9 e Tabela 10.

**Tabela 9** - Matriz de comparação em pares para o nível dos critérios

	Critério 1	Critério 2	Critério 3	Critério 4	Critério 5
Critério 1	1				
Critério 2		1			
Critério 3			1		
Critério 4				1	
Critério 5					1

**Fonte:** SAATY (2008) adaptado

**Tabela 10** - Matriz de comparação em pares para o nível das alternativas

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Alternativa 1	1			
Alternativa 2		1		
Alternativa 3			1	
Alternativa 4				1

**Fonte:** SAATY (2008) adaptado

Nota-se que os valores inseridos nas matrizes de comparação caracterizam a importância do valor inserido na linha contra a importância do valor inserido na coluna, de acordo com os valores apresentados na Tabela 8.

Assim como na pesquisa de Ahmad Alinejad, Pishvae e Bonyadi Naeini (2018), a aplicação de questionários para obtenção de dados primários na utilização do método AHP é

fundamental nesta pesquisa. A execução deles alcança a opinião de especialistas e decisores para uma análise qualitativa e impessoal na elucidação dos pesos dos critérios.

Após a coleta e análise adequada dos dados e filtragem dos pesos encontrados, o processo de preenchimento da matriz de comparação em pares é iniciada, onde a ordem da matriz é igual a quantidade de fatores comparados em cada matriz. Segundo Ghimire, Kim (2018) e Saaty (1977, 2008), seguem duas regras para preenchimento adequado das matrizes:

1.  $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ , onde essa notação indica a comparação de  $A_i$  em relação a  $A_j$ , onde se, por exemplo, o índice obtido for 6, logo imediatamente a relação inversa será de 1/6. Portanto se  $a_{ij} = k$ , então  $a_{ji} = \frac{1}{k}$ , para  $1 \leq k \leq 9$ ;
2.  $a_{ii} = 1$ , para todo  $i$ . Essa afirmação indica que todo fator comparado a ele mesmo possui grau de importância igual na escala fundamental.

De acordo com as afirmações tomadas acima, é possível concluir que a matriz de decisão sempre será quadrada, recíproca e positiva (LAMEIRA, 2019; OLIVEIRA; BELDERRAIN, 2008). De forma que as regras inferidas sejam obedecidas, a tabela x mostra um exemplo de matriz de decisão. Nota-se que a diagonal principal é igual a um valor unitário, a parte direita aos valores diagonais com os seus pesos e a parte esquerda à diagonal sendo valores inversos à parte direita.

**Figura 16** - Exemplo de matriz de decisão

$$\begin{vmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & 1/a_{3n} & \cdots & 1 \end{vmatrix}$$

**Fonte:** LAMEIRA (2019)

Após o preenchimento das matrizes de comparação em pares, é realizado o cálculo das prioridades relativas para os critérios e para as alternativas. Resumidamente, essa operação compreende a divisão de cada fator valor da matriz pelo respectivo total da coluna pertencente, obtendo assim a média de cada linha.

É importante destacar que para o emprego correto e coeso do método aqui proposto, é necessário a realização de algumas avaliações, seguindo uma coerência metodológica, a qual é exposta a seguir:

- Homogeneidade: A homogeneidade é fundamental para a comparação de coisas semelhantes, já que a mente tende a cometer grandes erros ao comparar elementos amplamente díspares. Por exemplo, não há como comparar um grão de areia com uma laranja em relação ao tamanho. Quando existe uma grande disparidade, os elementos são colocados em conjuntos separados de forma que o tamanho seja comparável, dando origem à ideia de níveis e sua decomposição (SAATY; KULAKOWSKI, 2016)
- Independência: Ter critérios dependentes causa um problema de "contagem dupla" que supervaloriza um aspecto específico do objetivo, contando duas vezes com dois critérios. Por exemplo, se houver cinco critérios no problema, enquanto dois deles forem dependentes, o aspecto representado por esses dois critérios terá 15% a mais de contribuição (40% em cinco critérios em vez de 25% em quatro critérios). Um quarto do problema se torna quase metade dele. Com variáveis mais dependentes, o viés aumenta de acordo (BULUT; DURU, 2018).
- Consistência lógica: Psicólogos argumentam que é mais fácil e preciso expressar a opinião de alguém em apenas duas alternativas do que simultaneamente em diversas alternativas (ISHIZAKA; LABIB, 2011). Destarte, ao configurar a hierarquia final do AHP com muitos elementos, o tomador de decisão deve tentar organizar esses elementos em grupos para que eles não difiram de maneiras extremas. Isso também permite que verificações de consistência de diferentes comparações pareadas sejam realizadas. O AHP usa uma escala de proporção que, ao contrário dos métodos que utilizam escalas de intervalo, não requer unidades na comparação (FRANEK; KRESTA, 2014).

A determinação dos pesos dos critérios de influência na seleção é um passo importante na maioria dos métodos MCDM. O PROMETHEE II não dispõe um meio de calcular os pesos dos critérios de influência, portanto o método assume que o tomador de decisão é capaz de determinar o peso de cada critério apropriadamente.

Em cada critério, a função de preferência traduz a diferença entre as avaliações obtidas por duas alternativas em certo grau de preferência que varia entre 0 e 1. São propostos seis

passos que facilitam a seleção de uma função específica de preferência (VINCKE, 1992): critério usual (1), critério em forma de “U” (2), critério em forma de “V” (3), critério em nível (4), critério em forma de “V” com critério de indiferença (5), e critério gaussiano (6). Esses tipos de critérios são particularmente fáceis de se definir. Para cada critério, o valor de um limite de indiferença ( $q$ ), o valor de um limite de preferência ( $p$ ) e o valor intermediário entre  $p$  e  $q$  ( $s$ ), devem ser fixos. Neste caso, esses parâmetros têm uma significância clara para o tomador de decisão.

O procedimento para aplicação adequada do PROMETHEE II é seguido da seguinte forma:

1. Determinação dos desvios com base em comparações em pares:

$$d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b) \quad (1)$$

Onde  $d_j(a, b)$  denota a diferença entre as avaliações dos critérios  $a$  e  $b$  em relação à cada critério.

2. Utilização de uma função de preferência relevante para cada critério:

$$P_j(a, b) = F_j[d_j(a, b)] \quad j = 1, \dots, k \quad (2)$$

Onde  $P_j(a, b)$  denota a preferência da alternativa  $a$  em comparação à alternativa  $b$  com relação à cada critério, como a função de  $d_j(a, b)$ .

3. Cálculo do índice de preferência global:

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b)W_j \quad (3)$$

Onde  $\pi(a, b)$  de  $a$  sobre  $b$  (de valor entre 0 e 1) é definido como a soma ponderada  $p(a, b)$  para cada critério, e  $W_j$  é o peso associado ao  $j$ ésimo critério.

4. Cálculo dos fluxos de superação (Classificação parcial da versão PROMETHEE I):

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_b \pi(a, b) \quad \text{e} \quad \phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_b \pi(b, a) \quad (4)$$

Onde  $\phi^+(a)$  e  $\phi^-(a)$  denota a superação positiva e negativa para cada alternativa, respectivamente.

5. Cálculo do fluxo de superação líquido (Classificação completa da versão PROMETHEE II):

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad (5)$$

Onde  $\phi(a)$  denota o fluxo de superação líquido para cada alternativa.

Dos procedimentos para aplicação do método é possível notar que quanto maior o  $\phi^+$  e menor o  $\phi^-$ , melhor será a alternativa. Além disso, é importante mencionar que apesar da avançada técnica de modelagem do método, o PROMETHEE II possui como pré-requisito informações precisas sobre os parâmetros utilizados.

Como supracitado, para realização da análise e da classificação das alternativas de sistemas propulsivos sem quantificação de pesos para os critérios foi utilizado o método ELECTRE IV, segundo a metodologia proposta por Roy and Hugonnard (1982).

A discordância de um critério  $g_j$  visa considerar que esse critério é mais ou menos discordante em relação à assertiva  $aSb$ . O máximo valor do índice de discordância é atingido quando o critério  $g_j$  coloca seu veto à relação de superação. Seu valor mínimo é atingido quando o critério  $g_j$  não é discordante com essa relação. A fim de definir o valor do índice de discordância na zona intermediária, é admitido que esse valor cresce proporcionalmente à diferença  $g_j(b) - g_j(a)$ . Esse índice é medido segundo a Equação 6.

$$d_j(aSb) = \begin{cases} 1 & \text{if } g_j(b) > g_j(a) + v_j(g_j(a)) \\ 0 & \text{if } g_j(b) \leq g_j(a) + p_j(g_j(a)) \\ \frac{g_j(b) - g_j(a) - p_j(g_j(a))}{v_j(g_j(a)) - p_j(g_j(a))}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

Já o índice de credibilidade é medido conforme a Equação 7.

$$\rho'(aSb) = c(aSb) \prod_{\{j \in \vartheta: d_j(aSb) > c(aSb)\}} \frac{1 - d_j(aSb)}{1 - c(aSb)} \quad (7)$$

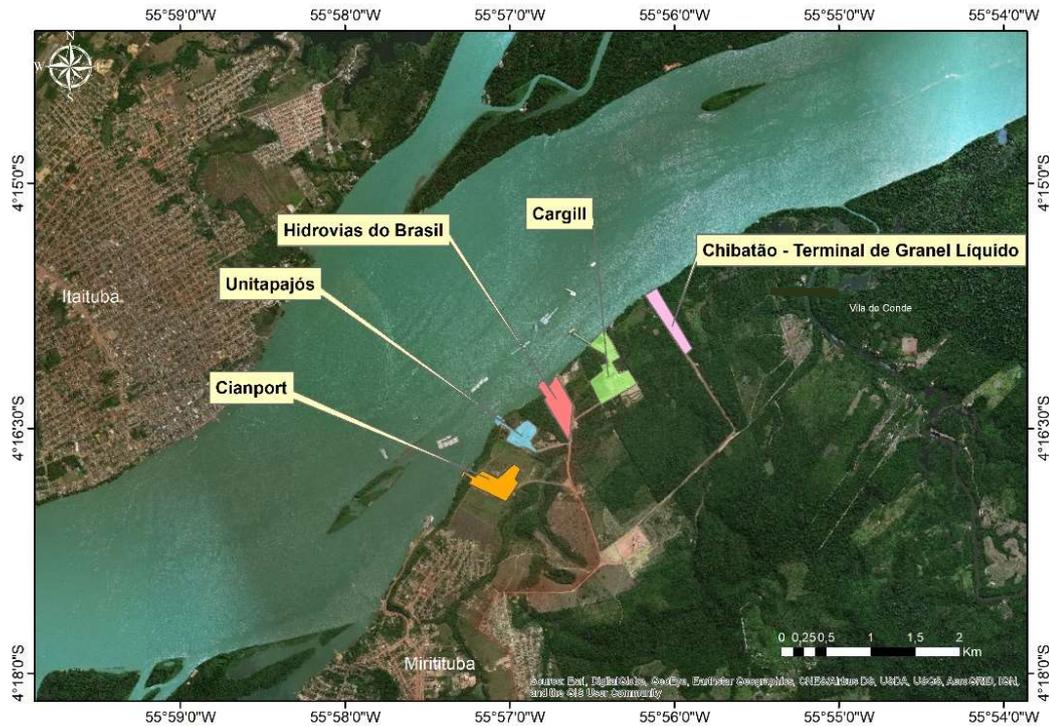
## 6. ESTUDO DE CASO

### 6.1 ÁREA DE ESTUDO

Além da quantificação da importância dos critérios, este estudo aplica o método proposto usando MCDM para uma avaliação de sistemas propulsores em embarcações que trafegam em vias navegáveis restritas.

Fazendo-se uso de um estudo de caso para Região Amazônica, que tem, em seu entorno, diversas zonas de influência com empreendimentos industriais que fazem uso dos cursos d'água presentes nela para o escoamento de suas produções, a exemplo das Estações de Transbordo de Carga (ETC's) em Miritituba, distrito do município de Itaituba (Figura 17).

**Figura 17 - Áreas de Influência - ETC's Miritituba**



Fonte: CPH (2019).

Estes terminais destacam-se como uma opção estratégica para o escoamento dos grãos produzidos no norte de Mato Grosso - especialmente das regiões de Sorriso, Matupá e Sinop. Nestas ETC's, a carga é transferida para barcaças, seguindo pelo Rio Tapajós e fazendo uso dos cursos d'água da região dos estreitos, se o destino for o Complexo Portuário de Vila do Conde. Chegando nos Terminais de Uso Privado em Vila do Conde, a carga é transferida para os navios que fazem uso do Canal do Quiriri para chegar no Oceano Atlântico e ser exportada ao mercado externo.

Para tanto, dada a importância da rota Miritituba-Vila do Conde (mostrada na Figura 18) para o Brasil e, sobretudo, para a Região Amazônica no que tange ao escoamento da

produção advinda do Centro-Oeste, esta foi usada como cerne de estudo para este trabalho, passando por cursos fluviais de fundamental importância para Região Amazônica, a exemplo do Rio Tapajós, Estreito de Breves e Rio Pará, até chegar nos Terminais de Uso Privado em Vila do Conde, os quais redistribuem a carga com destino ao mercado externo via Canal do Quiriri.

**Figura 18** – Rota de Estudo Miritituba - Vila do Conde



**Fonte:** Autor (2021).

Tal área de estudo não foi escolhida somente em virtude de sua importância para a logística de escoamento de cargas no Brasil, mas também dado o fato de que há a presença forte e dependente de comboios fluviais para o transporte destas produções nas hidrovias. Navegando muitas vezes com comboios de 25 barcaças ( $\pm 50.000$  TPB), tais comboios necessitam de empurradores fluviais com capacidade suficiente de percorrer estes trajetos com potência, capacidade de manobra e eficiências significativas para chegar em seus destinos, o que, por sua vez, justifica a escolha de tal área de estudo.

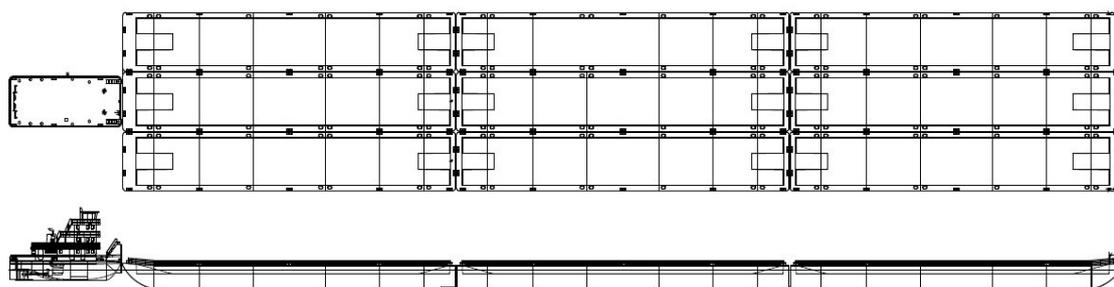
Estudos mostram que a soja exportada diretamente da Amazônia é 35% mais barata em comparação com as regiões sul e sudeste do Brasil (MTPA - MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, PORTOS E AVIAÇÃO, 2015). Segundo Figueiredo and Blanco (2014), o rio Tapajós, com 851 km de extensão, é o mais importante afluente da margem direita do rio

Amazonas. Em relação ao clima, a bacia encontra-se em zona de convergência intertropical e apresenta baixas pressões, sendo característica de regiões próximas ao equador.

O rio Tapajós se destaca nesta região por sua grande capacidade de escoamento de 20 milhões de toneladas por ano (ANA, 2014); é um ponto estratégico para o escoamento da soja produzida nas regiões norte e sudoeste do estado de Mato-Grosso e nas regiões sul e sudoeste do estado do Pará. A rota considerada nesta pesquisa é de extrema relevância para a exportação de soja pela Amazônia (conforme demonstrado pelas inúmeras empresas que estão se instalando nos dois locais). Portanto, o desenvolvimento econômico é necessário devido à vocação natural e aos crescentes investimentos e potencialidades desta região, especificamente ao longo da rota proposta; este trabalho é importante para a realização deste objetivo.

De acordo com Lameira et al. (2015), o modelo ideal para transporte por barcaças no rio Tapajós é denominado “tipo Mississippi”, o qual está representado na Figura 19 e as principais características estão listadas na Tabela 11. É definido pela restrição de rota, que possui duas eclusas de dimensões internas de 210 m x 33 m e constituem o fator fundamental na determinação das principais dimensões de projeto das barcaças que trafegam ao longo desta rota. Essas embarcações são classificadas como comboios de vias navegáveis interiores porque sua configuração permite que várias barcaças, sem propulsão, sejam acopladas a uma embarcação que as mova ao longo do rio. As três primeiras barcaças são do tipo *raked* (LAMEIRA; BRAGA; MORAES, 2015), uma vez que a forma do casco da embarcação determina diretamente a sua resistência ao avanço.

**Figura 19** – Representação do Comboio-tipo



**Fonte:** Autor (2021).

**Tabela 11** – Características do Comboio-tipo

Características	Empurrador	Barcaça	Barcaça <i>raked</i>
Comprimento total	29.25 m	60.00 m	60.00 m
Boca moldada	12.00 m	10.67 m	10.67 M
Profundidade	3.50 m	4.31 m	4.31 M
Calado de projeto	2.20 m	3.50 m	3.50 M
Peso morto	-	1905 Ton	1820 Ton

**Fonte:** Autor (2021).

## 6.2 CRITÉRIOS ANALISADOS

No que tange aos critérios analisados na pesquisa, teve-se a consideração inicial de 10 critérios, sendo eles:

- Segurança;
- Custos Operacionais;
- Custos de Manutenção;
- Custos de Aquisição;
- Eficiência Operacional;
- Vida Útil do Sistema;
- Impacto Ambiental;
- Ruídos;
- Velocidade; e
- Tempo de Manobra

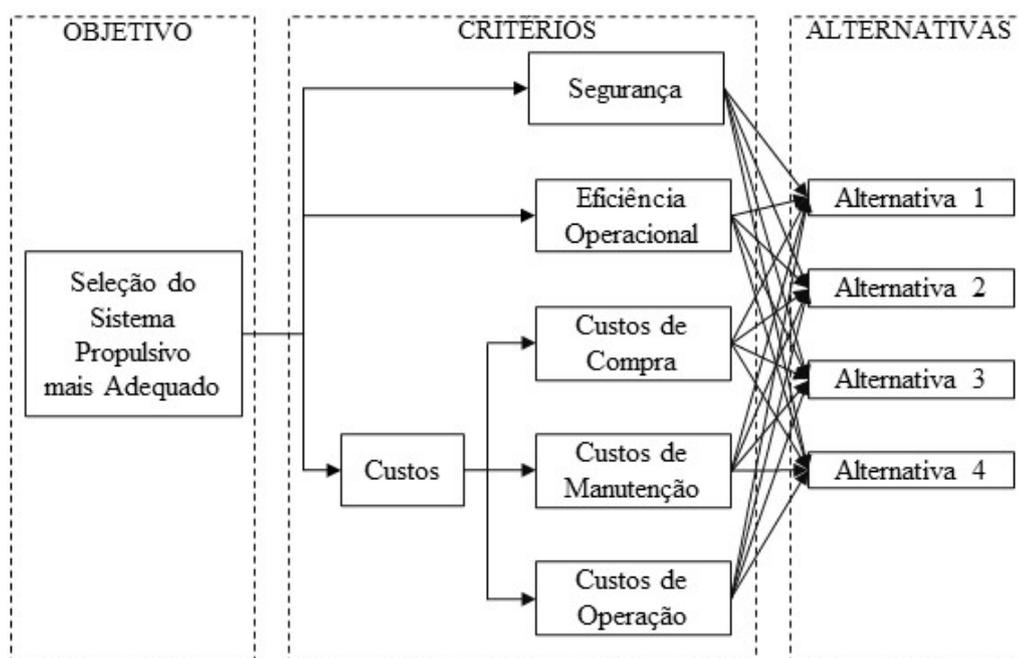
Entretanto, com o objetivo de fazer uso apenas dos critérios mais significativos de análise, aplicou-se a metodologia AHP (descrita anteriormente) para ranqueamento dos critérios e posterior seleção dos que obtiveram maiores valores de score.

Nesse sentido, com base no processo anterior, a decisão baseou-se em critérios de maior incidência no tratamento estatístico, sendo detalhado nos resultados este processo de escolha. Para tanto, os critérios foram os seguintes:

- Eficiência energética;
- Custos de compra;
- Custos operacionais;
- Custos de manutenção; e
- Segurança.

Os custos foram considerados como critérios integrais para as análises, tendo os custos de operação e manutenção como subcritérios, e sua correlação foi considerada. Assim, após definir o objetivo principal, fatores e alternativas, foi desenvolvido o modelo do problema para nortear a aplicação do método, conforme Figura 20.

**Figura 20** – Estruturação do Modelo Hierárquico



Fonte: Autor (2021).

De modo a detalhar os critérios definidos, os tópicos que seguem apresentam de forma direcionada os motivos de escolha destes a fim de aprimorar o entendimento e consolidar tais escolhas.

### 6.2.1 Eficiência energética

A eficiência energética do sistema é definida como a relação entre a energia de entrada e a energia de saída. Para a navegação, essa relação pode ser definida pela taxa de consumo e pelo trabalho de transporte, expressando diretamente o impacto causado pelo benefício adquirido (AHN et al., 2017).

Devido à ausência de indicadores e instrumentos que espelham a eficiência energética em embarcações operando em vias navegáveis interiores, esta pesquisa tomou como parâmetro o indicador atual utilizado para embarcações marítimas. O Indicador de Projeto de Eficiência Energética (EEDI), proposto pela IMO como ferramenta para estabelecer um limite ou referência de emissões para embarcações, é uma regulamentação obrigatória para todos os navios construídos desde 2013 (TRAN, 2017). O uso do EEDI é como indicador técnico obrigatório, pois reflete a eficiência das máquinas e equipamentos da embarcação. A mesma abordagem é utilizada para avaliar as emissões de gases poluentes ao longo da distância percorrida, nomeadamente, avalia o impacto ambiental da navegação. É utilizado para expressar a descarga de CO<sub>2</sub> gerada pelo transporte de cada unidade de tonelagem (quantidade de

embarques) e já se tornou um índice significativo para a eficiência energética da arquitetura naval (DURÁN-GRADOS et al., 2018).

A execução forçada do EEDI acelerou o processo de economia de energia e redução de emissões no mercado de construção naval, exigindo maiores requisitos para o desenvolvimento de navios verdes. O EEDI está intimamente relacionado às linhas do casco do navio, o que afeta muito o desempenho da vela e de outros recursos (BIALYSTOCKI; KONOVESSIS, 2016).

No entanto, sabe-se que uma quantidade razoável de parâmetros de incerteza afeta o EEDI, como resistência do navio, velocidade de serviço, alguns fatores da turbina e assim por diante. As opções disponíveis para atender a esses requisitos EEDI futuros são, em primeiro lugar, reduzir a resistência do casco para atingir a velocidade desejada com menos potência; segundo, para mudar para combustíveis com menor teor de carbono; terceiro para reduzir a velocidade do projeto através da instalação de menos energia; e quarto, várias combinações dessas medidas. Essas melhorias permitem uma redução de 30% nas emissões de CO<sub>2</sub> por tonelada milha náutica (nm) até 2025, em comparação com as permitidas para embarcações construídas em 2013–2014, e redução de 20% em comparação com embarcações construídas em 2015–2019 (SONER; AKYUZ; CELIK, 2018).

Para várias categorias de embarcações, a linha de base é calculada como uma razão de lei de potência, entre as emissões (gCO<sub>2</sub> / t.nm) e a capacidade de carga (dwt) (IMO, 2009; Lepore et al., 2017). A equação completa leva em consideração uma grande variedade de recursos, mas nesta pesquisa a forma simplificada da equação EEDI é suficiente para obter os resultados esperados. De forma simplificada, o EEDI é expresso na seguinte Equação 8.

$$EEDI = 3.11 \times \frac{C_{main} \times \sum_{i=1}^{NME} (P_{MEi}) + C_{aux} \times P_{AE}}{Capacity \times V_{ref}} \quad (8)$$

Onde  $P_{MEi}$  é 70% da potência instalada de cada motor principal, medida em kW; PAE é a potência necessária para fornecer carga máxima, medida em kW. A capacidade refere-se à capacidade máxima de carga, medida em toneladas de peso morto (dwt). Neste caso, 70% de utilização é assumido para este cálculo.  $V_{ref}$  é a velocidade de serviço, medida em nós.  $C_{main}$  e  $C_{aux}$  referem-se ao consumo específico de combustível para os motores principal e auxiliar, respectivamente, medido em g / kWh. O fator de emissão é de 3,11 gCO<sub>2</sub> / g de combustível.

### 6.2.2 Custos do sistema propulsivo

Devido à necessidade de avaliar diversos custos decorrentes da compra, operação e manutenção de um sistema propulsivo, o critério de custo foi dividido em subcritérios para facilitar a avaliação. Esses subcritérios foram definidos como custos de aquisição, custos operacionais e custos de manutenção.

De acordo com estudos (DURÁN-GRADOS et al., 2018) e (BIALYSTOCKI; KONOVESSIS, 2016), a eficácia do sistema propulsivo é um fator essencial para a economia da embarcação, uma vez que os gastos com combustível constituem cerca de 20% a 50% dos custos da embarcação (SONER; AKYUZ; CELIK, 2018). Ele será usado para calcular o consumo da embarcação sob o subcritério de custos operacionais.

Para o cálculo das classificações, o custo de compra e o custo de manutenção foram obtidos a partir dos preços médios tabulados do motor e do gerador, juntamente com os tipos de instalação propulsora, que são usados nas alternativas propostas para este estudo.

### 6.2.3 Segurança

Durante o transporte fluvial em regiões como a Amazônia, o posicionamento e a manutenção da estação são uma preocupação particular, para as quais as interações hidrodinâmicas são críticas (DU; OUAHSINE; SERGENT, 2018; PAULIDES et al., 2016a). De acordo com Du; Ouahsine e Sergent (2018), quando uma embarcação se move perto de uma margem, a proa é afastada da margem, o que é conhecido como *bow cushion*, e a popa é atraída pela margem, que é conhecida como *bank suction*. Se esses efeitos excederem os níveis limiares, as embarcações fluviais se tornam difíceis de controlar, o que pode levar a acidentes, como colisões.

Dessa forma, a manobrabilidade do navio em águas restritas tem sido reconhecida como crucial nos últimos anos e as pessoas vêm tentando melhorar os parâmetros. Nestes termos, ao considerar os vários obstáculos para aumentar a segurança do navio e reduzir o seu nível de risco, é claro que as capacidades de manobra inerentes continuam a ser um elemento chave.

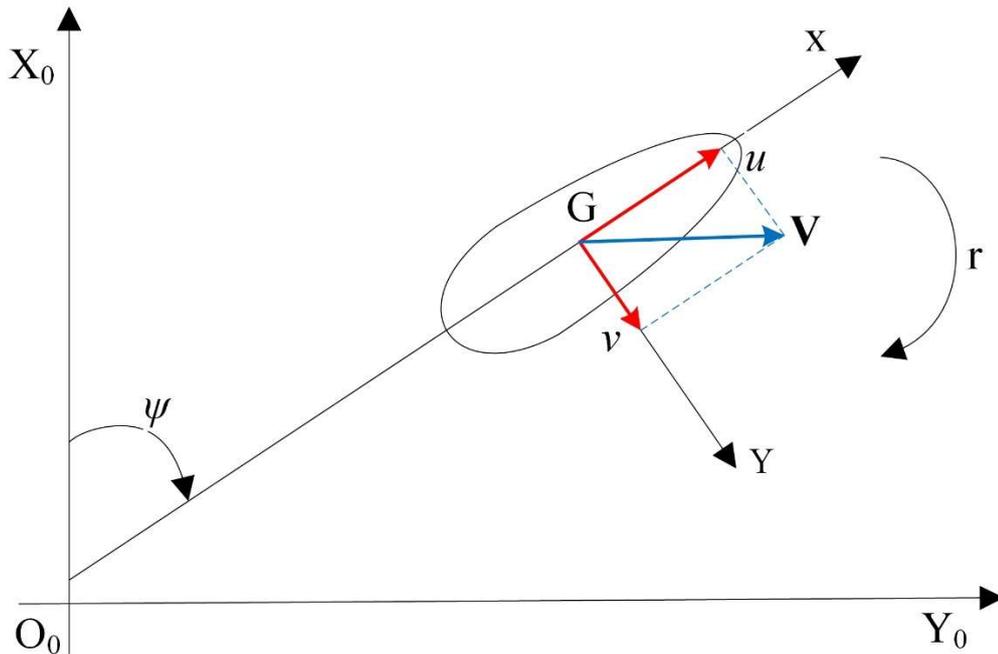
Nesse sentido, infere-se que a controlabilidade da embarcação está intimamente ligada a uma operação segura e eficiente. O estudo do assunto complexo da controlabilidade é geralmente dividido em três áreas:

- Manutenção de Curso: Refere-se à capacidade de manutenção de um curso ou rumo médio estável;
- Manobra: Refere-se à habilidade de mudar, de forma controlada, em uma determinada direção do movimento;

- Mudança de velocidade: Refere-se à capacidade de mudar, de forma controlada, em uma determinada velocidade (incluindo partida, parada e recuo).

Portanto, para avaliar a controlabilidade e a manobrabilidade dessas embarcações fluviais para cada sistema de propulsão, o problema de manobra do navio é avaliado conforme Ye Li et al. [87]. Primeiro, o sistema de coordenadas é definido como um sistema ortogonal destro cujo eixo Z é positivo para baixo, conforme Figura 21.

**Figura 21** – Sistema de Coordenadas de Velocidade e Direção



**Fonte:** Autor (2021).

As equações de movimento em mar aberto podem ser escritas como segue na Equação 9:

$$\begin{aligned} \dot{u} - vr - x_G r^2 &= gX^{II} \\ \dot{v} + ur + x_G r^2 &= gY^{II} \end{aligned} \quad (9)$$

$$LK_2^{II} \dot{r} + x_G (\dot{v} + ur) = gLN^{II}$$

Onde  $\dot{u}$  e  $\dot{v}$  são os componentes da aceleração nas direções dos eixos OX e OY;  $\dot{r}$  é a aceleração de guinada;  $g$  é a aceleração gravitacional;  $X^{II}$ ,  $Y^{II}$  and  $N^{II}$  são forças e momentos adimensionais;  $u$  e  $v$  são a velocidade de surto e a velocidade de oscilação, respectivamente;  $L$  é o comprimento do navio entre perpendiculares;  $x_G$  é a posição do centro de gravidade na direção OX;  $K_2^{II}$  é o raio adimensional de giro. Na Figura 20, G é o centro de gravidade do navio;  $O_0$  é o ponto de meia nau.

As influências da hidrovía restrita são implementadas nas equações anteriores como forças externas e momentos atuando no casco da embarcação e das barcaças. Assim, as Equações 10 de manobra da embarcação tornam-se:

$$\begin{aligned} \dot{u} - vr - x_G r^2 &= gX^{II} + gX_B^{II} \\ \dot{v} + ur + x_G r^2 &= gY^{II} + gY_B^{II} \end{aligned} \quad (10)$$

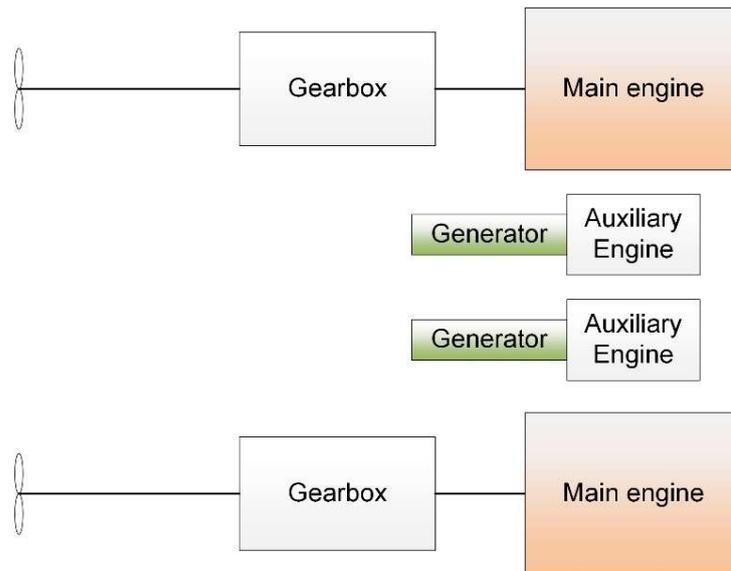
$$LK_2^{II} \dot{r} + x_G (\dot{v} + ur) = gLN^{II} + gLN_B^{II}$$

Onde  $X_B^{II}$ ,  $Y_B^{II}$  e  $N_B^{II}$  são as forças não dimensionais de oscilação e oscilação e o momento de guinada não dimensional da interação entre o banco de vasos ou o fundo do vaso, respectivamente.

### 6.3 ALTERNATIVAS ANALISADAS

Após um levantamento, várias alternativas de sistemas propulsivos que são usados no transporte fluvial na região amazônica e no sul do Brasil foram avaliadas de acordo com o tipo de hélice e o tipo de geração de energia que é usada para a propulsão. Uma das alternativas típicas de sistemas de propulsão usados nessas embarcações é baseada em motores a diesel. De acordo com Geertsma et al. (2017a), esse sistema é composto pelo motor principal, que normalmente é um motor diesel ou, ocasionalmente, turbinas a gás e uma hélice, que é conectado ao motor principal diretamente ou por meio de engrenagens.

**Figura 22** – Ilustração de Sistema de Motor a Diesel



Fonte: Autor (2021).

Este tipo de propulsão usa motores a diesel, que são otimizados para operação em uma faixa de carga especificada que é tipicamente 70 a 100% de sua classificação contínua máxima (MCR) (CARIOU, 2011; JAFARZADEH; SCHJØLBERG, 2018; SMITH et al., 2015). No entanto, os perfis operacionais das embarcações fluviais incluem diversas demandas de energia devido à necessidade de manobras recorrentes (PAULIDES et al., 2016a). Essa instalação é composta por dois eixos de hélice, cada um acionado por um motor diesel acoplado por uma caixa de câmbio a uma hélice.

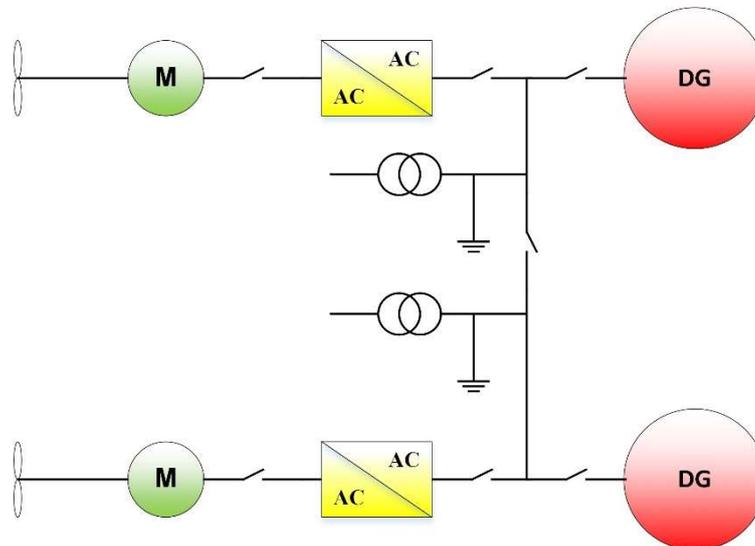
Ao contrário dos grandes navios de carga, os navios menores, como embarcações fluviais, requerem uma caixa de engrenagens para reduzir a velocidade de rotação do motor, uma vez que estes são movidos por motores de média ou alta velocidade. Uma caixa de engrenagens pode ser usada para reverter a rotação do eixo na caixa de reversão. Segundo Geertsma et al. (2017a), o tipo de hélice normalmente utilizado neste sistema é a hélice de passo fixo (FPP). Este tipo de sistema de propulsão requer uma caixa de engrenagens ou um motor reversível para parar ou reverter. Alternativamente, a hélice de passo controlável (CPP) pode fornecer contra-tração para parada ou reversão. Outros tipos de sistemas de propulsão usados em embarcações são jatos d'água, hélices de perfuração de superfície, hélices cicloidais, rodas de pás, cauda de baleia e propulsão magneto-hidrodinâmica (CARLTON, 2012).

O CPP pode ser usado para superar a dificuldade de sistemas de reversão usando FPP, uma vez que este tipo de hélice fornece um grau mais alto de controle de degrau (WOUD; STAPERSMA, 2002a). A redução de passo reduz a tração da hélice e a potência que é absorvida pelo motor em uma rotação do eixo, permitindo assim que a tração seja reduzida abaixo da rotação mínima do motor e do passo geral. Além disso, a reversibilidade do passo permite que a tração seja suspensa ou invertida sem inverter o motor ou a caixa de câmbio. O CPP afeta positivamente a capacidade de manobra da embarcação e seu desempenho.

Uma alternativa de sistema de propulsão utilizada em embarcações desse tipo é a propulsão diesel-elétrica ou a propulsão elétrica. De acordo com Mcguirk & O'neill, (2016), as principais vantagens desse tipo de propulsão são flexibilidade (melhor aproveitamento do espaço), economia operacional superior, menor manutenção e menor dano ambiental. Este tipo de sistema é tipicamente utilizado com hélices *pod*, os quais, segundo Carlton (2012), apresentam vantagens significativas em termos de manobrabilidade apesar de terem tendência a apresentar fortes excitações, aumentando substancialmente a taxa de manutenção da cavitação. A instalação considerada é composta por dois grupos geradores a diesel, um

barramento de distribuição de energia com 440 Volts, dois conversores de corrente alternada e dois motores elétricos, ambos acionando uma hélice, conforme mostrado na Figura 23.

**Figura 23** – Ilustração de Sistema de Motor a Diesel-Elétrico



**Fonte:** Autor (2021).

Este trabalho apresentou quatro alternativas de sistemas propulsivos, os quais são classificados quanto ao tipo de geração de energia e tipo de instalação propulsora e representam o cenário do transporte fluvial brasileiro:

- Um motor diesel e uma hélice de passo fixo;
- Um motor diesel e uma hélice de passo controlável;
- Um motor diesel e um propulsor de azimut;
- Um gerador elétrico a diesel e uma hélice azimutal.

Nessas alternativas é utilizado um motor padrão com potência de aproximadamente 1000 HP, por ser esta a potência média que é utilizada para propulsão em embarcações na região estudada. Assim, um motor diesel, nomeadamente, MAN D2842 1000 HP, e um gerador diesel-elétrico, nomeadamente, Wartsilla 20Gneset 4L20 760 KW, foram selecionados como alternativas para os cálculos.

As alternativas foram definidas da seguinte forma:

- 1) Propulsão a diesel, motor MAN D2842 de 1000 HP, com hélice convencional de passo fixo;
- 2) Propulsão a diesel, motor MAN D2842 de 1000 HP, com hélice de passo controlável;
- 3) Propulsão Diesel, motor MAN D2842 de 1000 HP, utilizando hélice azimutal;
- 4) Propulsão diesel-elétrica, com dois geradores Wartsilla 20genset 4L20, com geração de 760 KW, utilizando propulsão azimutal.

#### 6.4 SELEÇÃO DO SOFTWARE SUPER DECISIONS EM APOIO AO AHP

O software Super Decisions é implementador do processo analítico através de rede (ANP) e AHP para tomada de decisão com a vinculação e feedback desenvolvido pelo Dr. Thomas Saaty. Esse programa foi documentado pela Equipe ANP, que trabalha para a Fundação Creative Decisions. Hoje sua última versão é gratuita e é imprescindível cadastrar-se no site [www.superdecisions.com](http://www.superdecisions.com) por ser exclusiva (ADAMS; SAATY, 2003).

A escolha do software para automatizar as intervenções matemáticas foi software Super Decisions, pois promove a tomada de decisão, em primeiro lugar, ao apoiar para que o índice de consistência no momento de cada julgamento. Ainda é simples ao gerar modificações tais como: adicionar, extinguir critérios ou escolhas, assim como o intercâmbio de avaliações.

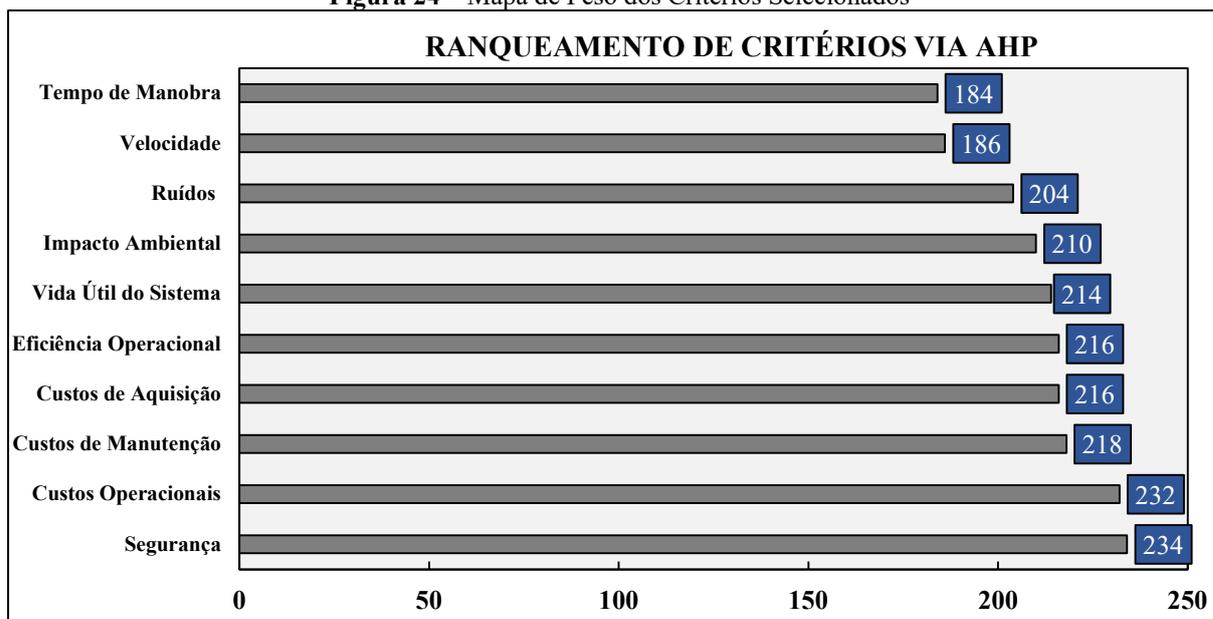
Também na ocasião da ponderação dos resultados, o software propicia um julgamento de sensibilidade, de forma a obter uma melhor opção de tomada de decisão.

Ainda é de domínio público possuir excelente interface para usuário, contudo não oferece uma interface para a entrada das avaliações para mais de um decisor. Entretanto, estas podem ser adquiridas usando a média geométrica para cada peso por decisor.

## 7. RESULTADOS

A estrutura hierárquica foi formada em torno da classificação fatorial apresentada. O processo de decomposição do problema em uma árvore hierárquica foi o seguinte (HARPE, 2015; LI, 2013; WADGAVE; KHAIRNAR, 2016): Cinco fatores foram identificados para avaliação do desempenho do sistema propulsivo em vasos fluviais. A estrutura hierárquica definida a partir das respostas obtidas no questionário é apresentada na Figura 24.

Figura 24 – Mapa de Peso dos Critérios Seleccionados



Fonte: Autor (2021).

### 7.1 RESULTADOS DA HIERARQUIZAÇÃO DOS FATORES DE INFLUÊNCIA NA SELEÇÃO DE SISTEMAS PROPULSIVOS

Para obtenção da hierarquização dos fatores de influência na seleção de sistemas propulsivos, fez-se uso da aplicação de questionários para uso na metodologia AHP. De acordo com tais questionários, obtiveram-se os valores de percentagem de recorrência de respostas, tendo-se Segurança (11,07%) como o fator mais influente no desempenho do sistema propulsivo para comboios fluviais na Amazônia, seguido por custos operacionais (10,97%), custos de manutenção (10,31%), custos de aquisição (10,22%) e eficiência energética (10,22%). Conseqüentemente, esses fatores foram selecionados para a análise MCDM. Os demais fatores juntos constituem aproximadamente 47,21% da influência da avaliação de desempenho.

No que tange aos resultados analíticos derivados dos dados obtidos por meio da aplicação do primeiro questionário, tem-se que estes encontram-se listados na Tabela 12, que

apresenta o score de fatores de influência para tais critérios, elencando-se a quantidade de repostas aos valores de impacto de cada uma, resultando no score final.

**Tabela 12** - Scores de fator de influência para seleção propulsiva na navegação fluvial na Amazônia

Fator de influência	5	4	3	2	1	Score total
Velocidade	16	14	14	0	8	186
Impacto ambiental	22	16	8	6	0	210
Ruído	14	24	10	4	0	204
Eficiência	26	14	8	2	2	216
Custos Operacionais	32	12	8	0	0	232
Custos de Manutenção	26	10	16	0	0	218
Custos de Aquisição	28	8	12	4	0	216
Vida útil	20	20	11	0	1	214
Segurança	30	18	4	0	0	234
Tempo de manobra	15	16	12	0	9	184

**Fonte:** Autor (2021).

## 7.2 RESULTADOS DA QUANTIFICAÇÃO DOS PESOS DOS CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DE SISTEMAS PROPULSIVOS VIA AHP

O AHP foi aplicado usando quatro alternativas e três critérios de análise, com o critério de custo subdividido em 3 subcritérios. Uma escala de prioridade foi atribuída a cada matriz de comparação emparelhada.

De acordo com a frequência de resposta dos questionários, avaliando-se somente quantidade de respostas obtidas, teve-se a Segurança (60,43%) como o fator mais influente para sistemas propulsivos em comboios fluviais na Amazônia, seguido por custos (20,90%) e eficiência energética (18,66%).

Selecionados os critérios de análise a partir da abordagem supracitada, teve-se, então, a obtenção do resultado analítico das categorias de três fatores por meio de matrizes de comparação par a par, construídas com base nos dados das entrevistas com especialistas, apresentadas na Tabela 13.

**Tabela 13** - Matriz de comparação de pares para fatores

Critério	Segurança	Custos	Eficiência	Pesos
Segurança	1	1,14	3,38	0,46
Custos	0,88	1	3,25	0,41
Eficiência	0,30	0,31	1	0,13

**Fonte:** Autor (2021).

De acordo com a Tabela 13, a segurança foi considerada o fator de maior influência para o desempenho do sistema propulsivo na navegação hidroviária interior ao longo da rota

amazônica, o que corresponde a um peso de 46%, seguido por custos e eficiência energética, com pesos de 41% e 13%, respectivamente.

Também foram calculados os pesos dos subcritérios dos custos que influenciam o desempenho do sistema propulsivo. Conforme listado na Tabela 14, sob o fator custos, os custos operacionais (54,86%) são o fator mais influente e de maior relevância para o custo final, seguidos pelos custos de manutenção (25,32%) e custos de aquisição (19,81%), que se encontraram bastante abaixo dos custos operacionais em termos de peso.

**Tabela 14** - Matriz de Comparação Paritária para Custos

Subcritério de custos	Aquisição	Operação	Manutenção	Pesos
Aquisição	1	0,33	0,85	0,20
Operação	3,04	1	1,99	0,55
Manutenção	1,18	0,50	1	0,25

**Fonte:** Autor (2021).

Para a seleção de um sistema propulsivo para um Tanker de hidrogênio liquefeito, a economicidade do sistema foi o fator de maior relevância (AHN et al., 2017) enquanto para um estudo de seleção entre sistemas híbridos, diesel-elétrico e diesel os custos e riscos ambientais foram os fatores de maior relevância (JEONG et al., 2018a). Assim, cada área de estudo tem sua própria situação, contexto econômico e condições geográficas que levam a variações nos resultados de cada estudo, o que exige abordagens diferentes para obtenção de resultados em cada situação específica.

### 7.3 RESULTADOS DAS ALTERNATIVAS À LUZ DOS CRITÉRIOS

De acordo com Marins, Souza e Barros (2009), a representatividade dos cálculos das prioridades médias locais (PML's) ocorre através da média aritmética das linhas da matriz normalizada, que representa a prioridade de cada artifício, segundo o método AHP. Dessa forma obteve-se os resultados das prioridades para cada um dos critérios e subcritérios analisados.

Nas Tabelas que seguem realizou-se a comparação paritária dos critérios (custos, segurança e eficiência energética) e também subcritérios de custos (aquisição, manutenção e operacional). A partir de tais comparações, verificou-se que para os custos operacionais, segurança e eficiência energética a Alternativa 4 foi a mais adequada; e para os custos de manutenção e custos de aquisição a Alternativa 1 foi a mais bem ranqueada.

Para sistemas de propulsão em embarcações que navegam na região amazônica, o sistema convencional a diesel tem preferência maior do que os demais sistemas, presumivelmente como a alternativa preferida em termos de custos de aquisição. Porém, de

acordo com Paulides et al. (2016), para sistemas de propulsão diesel-elétricos em embarcações menores e que requerem alto desempenho em termos de variação de velocidade e direção, os sistemas diesel-elétricos são preferidos.

#### a. Comparação Paritária para Custos Operacionais

No que tange à comparação par a par para os custos operacionais (Tabela 15) em relação às quatro alternativas analisadas, verificaram-se melhores valores de score para Alternativa 4, isto é, com o uso de Propulsão diesel-elétrica, com dois geradores Wartsilla 20genset 4L20, com geração de 760 KW, utilizando propulsão azimutal. Tal alternativa, ao ser comparada com a Alternativa 1 obteve relevância de 3,46; ao ser comparada com a Alternativa 2 obteve relevância de 3,10; e, por fim, ao ser comparada com a Alternativa 3, obteve relevância de 4,25. Dessa forma, verifica-se que a Alternativa 4 configura-se fortemente como a mais recomendada em relação as demais na opinião dos especialistas consultados.

**Tabela 15** - Matriz de Comparação Paritária para Custos Operacionais

Custos Operacionais	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Alternativa 1	1	0,45	2,46	0,29
Alternativa 2	2,23	1	2,74	0,32
Alternativa 3	0,41	0,36	1	0,24
Alternativa 4	3,46	3,10	4,25	1

**Fonte:** Autor (2021).

A fim de justificar e entender os motivos de escolha por parte dos especialistas da alternativa 4, faz-se necessário o entendimento das vantagens de utilização da combinação de sistema propulsivo correspondente à alternativa 4. Nesse sentido, tem-se que dependendo do perfil operacional, a propulsão diesel-elétrica pode reduzir significativamente o consumo de energia e as emissões, pois permite ajustar as necessidades de propulsão às reais condições operacionais (CHAI et al., 2016b; SETYO KOENHARDONO; AMIADJI, 2018). Enquanto os acionamentos diretos devem cobrir toda a faixa de potência, os trens de acionamento diesel-elétricos consistem em pelo menos dois grupos geradores com distribuição adequada de potência. Isso permite o uso de motores a diesel com mais eficiência, desligando um grupo gerador quando não for necessário, levando a cargas otimizadas dos motores (JAFARZADEH; SCHJØLBERG, 2018; JEONG et al., 2018b; WOULD; STAPERSMA, 2002a).

Dadas as condições supracitadas e devido à melhor eficiência de combustível dos motores diesel na carga ideal, os custos operacionais e as emissões são reduzidos com a redução do consumo de combustível (PAULIDES et al., 2016b; WOULD; STAPERSMA, 2002b), justificando e reafirmando os resultados obtidos na comparação paritária, que indicou o uso de propulsão diesel-elétrica como a mais adequada.

### b. Comparação Paritária para Custos de Manutenção

Em segunda análise, tem-se a comparação paritária para custos de manutenção, em que as quatro alternativas foram confrontadas a partir da metodologia AHP, obtendo-se maiores valores de score para a Alternativa 1, com o uso de Propulsão a diesel, motor MAN D2842 de 1000 HP, com hélice convencional de passo fixo. A Alternativa em questão obteve valores de score significativamente maiores em relação a demais, com relevância de 2,02 em relação à Alternativa 2; 3,12 em relação à Alternativa 3 e, por fim, 4,29 em relação à Alternativa 4.

**Tabela 16** - Matriz de Comparação Paritária para Custos de Manutenção

Custos de Manutenção	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Alternativa 1	1	2,02	3,12	4,29
Alternativa 2	0,49	1	2,78	4,24
Alternativa 3	0,32	0,36	1	1,38
Alternativa 4	0,23	0,24	0,73	1

Fonte: Autor (2021).

### c. Comparação Paritária para Custos de Aquisição

Em complementação, fez-se a análise paritária das alternativas no que tange aos custos de aquisição, sendo verificados os maiores valores para a Alternativa 1 novamente, semelhante ao obtido para os custos de manutenção. A Alternativa em questão obteve valores de score significativamente maiores em relação a demais, com relevância de 2,10 em relação à Alternativa 2; 4,21 em relação à Alternativa 3 e, por fim, 4,33 em relação à Alternativa 4.

**Tabela 17** - Matriz de Comparação Paritária para Custos de Aquisição

Custos de Aquisição	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Alternativa 1	1	2,10	4,21	4,33
Alternativa 2	0,48	1	4,01	3,93
Alternativa 3	0,24	0,25	1	2,05
Alternativa 4	0,23	0,25	0,49	1

Fonte: Autor (2021).

Tal escolha justifica-se pela simplicidade do sistema escolhido para o critério analisado, o que, eventualmente, reduz seus custos de aquisição, haja vista que as demais alternativas avaliadas configuram-se com maiores custos de aquisição devido às tecnologias embarcadas e vantagens operacionais que estas possibilitam em relação à alternativa vencedora no ranqueamento para o subcritério em questão. Dessa forma, destaca-se que apesar da alternativa vencedora para custos de aquisição configurar-se como um sistema propulsivo convencional, o mesmo nem sempre se apresenta como o menor custo total, visto que os demais custos devem ser considerados para tal avaliação conjunta.

#### d. Comparação Paritária para Segurança

De acordo com a Tabela 18, a Alternativa 4 se destaca em relação à comparação paritária no que tange a segurança, sendo fortemente preferida em relação às Alternativas de Segurança 1, 2 e 3, com 1,78, 1,26 e 1,05 na quarta linha da referida tabela.

**Tabela 18** - Matriz de Comparação Paritária para Segurança

Segurança	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Alternativa 1	1	0,71	0,59	0,56
Alternativa 2	1,41	1	0,84	0,79
Alternativa 3	1,69	1,20	1	0,95
Alternativa 4	1,78	1,26	1,05	1

Fonte: Autor (2021).

#### e. Comparação Paritária para Eficiência Energética

As alternativas 2 e 4 são preferidas em termos de eficiência energética em relação às alternativas 1 e 3. As alternativas 2 e 4 tiveram poucas diferenças em termos de preferência, mostradas na Tabela 19.

**Tabela 19** - Matriz de Comparação Paritária para Eficiência Energética

Eficiência Energ.	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Alternativa 1	1	0,89	1,11	0,71
Alternativa 2	1,12	1	1,24	0,79
Alternativa 3	0,90	0,80	1	0,64
Alternativa 4	1,41	1,26	1,57	1

Fonte: Autor (2021).

No contexto da escolha da propulsão diesel-elétrica (DE) como a mais adequada (conforme evidenciado na tabela supracitada), justifica-se a partir do fato de que o sistema de propulsão DE é essencialmente uma transmissão para mudar a velocidade relativamente alta e o torque baixo do motor principal para a velocidade extremamente baixa e o torque alto necessários para girar as hélices, proporcionando ganho de manobra e direção, redução do consumo de combustível e impacto ambiental. Além disso, outros fatores estão relacionados com novas opções de arranjo da máquina, como melhor controle e maior capacidade de torque e uma transmissão mais macia. Em síntese para a análise de eficiência energética, todos os fatores explicitados anteriormente corroboram com a escolha de tal alternativa, haja vista que justificam e validam esta.

Em resumo, os pesos que quantificam os resultados dos critérios e os resultados da avaliação alternativa em termos dos critérios identificados estão listados na Tabela 20, sendo os maiores resultados apresentados a verde e os menores a vermelho.

**Tabela 20 – Pesos Finais**

Criteria	Custos de Aquisição	Custos Operacionais	Custos de Manutenção	Eficiência Energ.	Segurança
Pesos	0,08	0,23	0,11	0,13	0,44
Alternativa 1	4,813	4,661	1,518	2,256	1,698
Alternativa 2	3,273	3,166	2,382	2,526	2,399
Alternativa 3	1,138	1,27	0,877	2,035	2,871
Alternativa 4	0,776	0,902	5,224	3,184	3,031

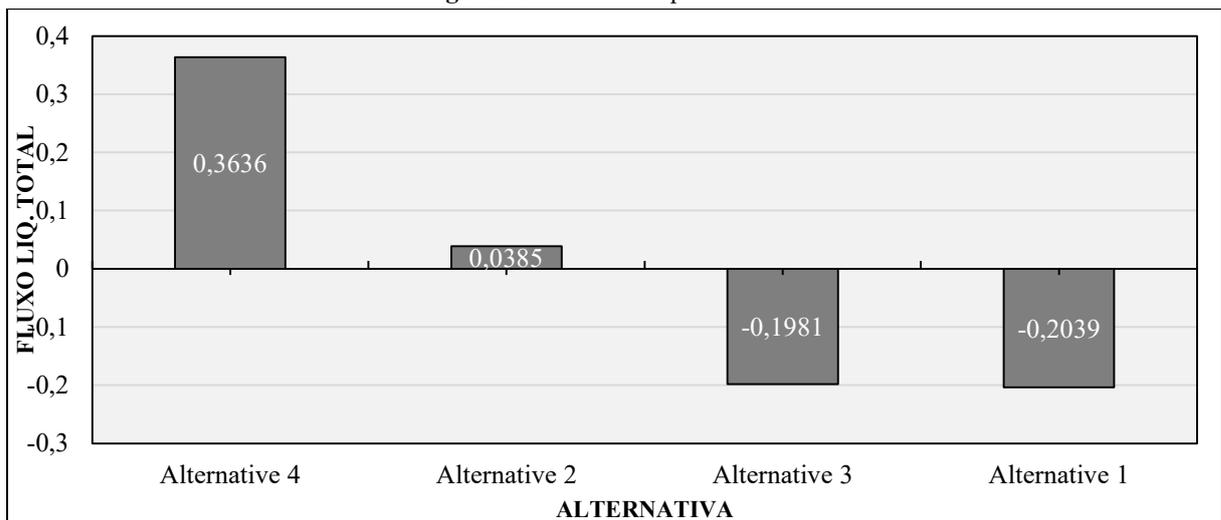
Fonte: Autor (2021).

#### 7.4 RESULTADOS DA HIERARQUIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS DE SISTEMAS PROPULSIVOS VIA PROMETHEE

Com base na análise integrada AHP-PROMETHEE proposta, de acordo com as alternativas finais de classificação do sistema propulsivo, a Alternativa 4 foi a alternativa mais adequada para os critérios de navegação considerados (Amazônia), com vazão líquida total de 0,363. A alternativa 2 também foi satisfatoriamente eficaz, de acordo com os resultados, com fluxo líquido total de 0,038. A Alternativa 3 e a Alternativa 1 foram alternativas menos adequadas para este tipo de navegação, com vazões líquidas totais de -0,1981 e -0,2039, respectivamente.

Os fluxos líquidos totais e os resultados da classificação final são apresentados na Figura 25.

**Figura 25 – Fluxos Líquidos Totais**



Fonte: Autor (2021).

Em complementação, apresenta-se na tabela 21 apresenta-se a Classificação final e fluxos líquidos totais por AHP-PROMETHEE, com os valores detalhados de cada fluxo e demais variáveis envolvidas na metodologia PROMETHEE.

**Tabela 21** – Classificação final e fluxos líquidos totais por AHP-PROMETHEE

Alternativas	$\phi^+$	$\phi^-$	$\phi$	Rank
Alternativa 4	0,6818	0,3182	0,3636	1
Alternativa 2	0,5192	0,4808	0,0385	2
Alternativa 3	0,4009	0,5991	-0,1981	3
Alternativa 1	0,398	0,602	-0,2039	4

Fonte: Autor (2021).

## 7.5 RESULTADOS DA PRIORIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS UTILIZANDO O MÉTODO ELECTRE IV

Com a finalidade de aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos anteriormente, considerar alternativas para o decisor e explicitar as diferentes influências dos fatores para seleção, foi considerada a hipótese em que não é estabelecido a importância relativa de cada critério, utilizando o método ELECTRE IV neste trabalho.

Analogamente às seções anteriores, foram realizadas análises para as alternativas. Os resultados da análise de preferência das alternativas são apresentados na Tabela 15, onde "P +" denota que a alternativa na coluna domina a alternativa na linha da tabela e "P-" denota que a alternativa na linha domina a alternativa na coluna. A ordenação final obtida com o método indicou que a Alternativa 4 é o sistema propulsor mais adequado para a navegação na rota Miritituba-Vila do Conde e a Alternativa 3 é a menos adequada.

A classificação das alternativas utilizando o método ELECTRE IV, desconsiderando a importância relativa de cada critério, é demonstrada na Tabela 22.

**Tabela 22** – Ranking ELECTRE

Ranking	Ascend.	Descend.	Média
Alternativa 4	1	1	1
Alternativa 2	2	2	2
Alternativa 1	3	3	3
Alternativa 3	4	4	4

Fonte: Autor (2021).

**Tabela 23** – Dominância ELECTRE

Dominance	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Alternativa 1	0	P-	P+	P-
Alternativa 2	P+	0	P+	P-
Alternativa 3	P-	P-	0	P-
Alternativa 4	P+	P+	P+	0

Fonte: Autor (2021).

Os resultados de classificação alternativa que foram obtidos em que a importância relativa de cada critério não foi considerada, estão listados na Tabela 23.

Esses resultados são importantes para aumentar a confiabilidade que foram obtidos anteriormente, para considerar alternativas para o tomador de decisão e para identificar as influências dos fatores para o desempenho.

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação é uma proposta para estimular uma discussão que possa municiar determinadas respostas para a posterioridade nos setores que rodeiam a cadeia produtiva do agronegócio brasileiro, tais como a cadeia logística e portuária, bem como possa ser empregado em benefício de conveniente solução.

Estes estudos bibliográficos, assim como os efeitos desta pesquisa remetem a relevância do mercado das exportações dos grãos soja e milho na economia do Brasil e sua relevância mundial nesse segmento.

Em complementação, o trabalho em questão apresenta uma análise usando um método de ponderação linear, AHP-PROMETHEE, para avaliar os fatores de influência e classificar o desempenho de sistemas de propulsão alternativos em trens fluviais. O método utilizado possibilitou um estudo envolvendo propriedade de unidades incomparáveis, possibilitando a análise dos diferentes impactos que cada critério realiza no estudo de desempenho. Os números que representam os resultados são números relativos, que não têm significado real, mas refletem as diferenças em termos de influência entre os fatores analisados. O método também permitiu abordar cada fator e cada alternativa separadamente, facilitando uma visão mais aprofundada dos resultados.

A contribuição desta pesquisa fundamentou-se na integração das perspectivas de custo, eficiência energética e segurança sem perda de dados, mostrando as vantagens e desvantagens de cada alternativa em relação a cada fator analisado.

No contexto amazônico, área de estudo desta pesquisa, a alternativa propulsiva exposta na alternativa 1 é mais aceita, geralmente devido à grande economia em sua aquisição. No entanto, a segurança foi avaliada pelo método adotado como o fator mais relevante na avaliação do desempenho de sistemas alternativos. A influência desse fator substancial se deve aos perigos que surgem na navegação na região estudada, como bancos de areia, rochas submersas ou outros obstáculos, além de correntes de alta velocidade e objetos que são transportados por eles; portanto, alta capacidade de manobra é necessária para uma navegação segura.

O custo é um critério de grande importância em qualquer análise do desempenho do sistema de propulsão; entretanto, especialmente na Amazônia, sua análise de influência torna-se imprescindível devido ao aumento dos incentivos orçamentários ao transporte aquaviário nesta região, com foco na movimentação de cargas, que é a principal consideração neste trabalho. A eficiência energética é o terceiro fator mais influente neste estudo. A elevada importância deste fator se deve à crescente necessidade de controle energético, medidas de

redução de perdas e racionalização técnico-econômica dos fatores de produção, resultando em inúmeros benefícios do ponto de vista ecológico e de sustentabilidade; além disso, as fontes de suprimento de energia são um recurso estratégico nos processos produtivos.

Devido a esses resultados sobre as perspectivas analisadas, a alternativa propulsora com melhor desempenho em relação ao método adotado foi aquela exposta na alternativa 4. Apesar de ter custos de aquisição e manutenção superiores às outras alternativas, a vantagem de utilizar este sistema propulsivo é que deve maior eficiência energética a esse tipo de navegação, que resulta em menor consumo de combustível e menores custos operacionais para a embarcação, e devido à sua alta manobrabilidade, que afeta diretamente a segurança da navegação.

Em complementação, de modo a validar o processo de seleção da Alternativa 4 como a mais viável para a navegação analisada, fez-se uso da bibliografia em Jafarzadeh e Schjøberg (2018); Jeong et al. (2018b); Woud e Stapersma, (2002a) para validar tal escolha. Destaca-se que o conceito técnico aplicado para a propulsão de embarcações depende do tipo de embarcação, velocidade alvo e perfil de navegação. Nesse sentido, para se beneficiar de uma conversão para propulsão diesel-elétrica, uma embarcação deve atender a um ou mais dos seguintes critérios (PAULIDES et al., 2016b; WOULD; STAPERSMA, 2002b):

- a. Alta demanda de energia elétrica com alto grau de cargas variáveis;
- b. Alto grau de carga parcial para propulsão;
- c. Alta demanda de conforto;
- d. Altas demandas de redundância;
- e. Altas demandas de manobrabilidade.

Ao analisar o contexto da navegação de comboios amazônico, verifica-se que estes atendem a três dentre os critérios supracitados, sendo estes: Alta demanda de energia elétrica com alto grau de cargas variáveis; Alto grau de carga parcial para propulsão; e Altas demandas de manobrabilidade, justificando e validando, portanto, a escolha e o resultado obtido com a aplicação metodológica.

Em complementação, o uso de um método sem considerar as influências dissimilares dos diferentes fatores foi uma forma eficaz de mostrar a robustez e confiabilidade do método anterior. Nesta hipótese, o sistema foi selecionado devido ao seu domínio superior de critérios sobre outras alternativas. Ao contrário da primeira análise, o sistema diesel tradicional teve um desempenho inferior ao do sistema azimute com motor de combustão interna, pois o seu domínio sobre as outras alternativas foram menores, comprovando a sensibilidade aos diferentes cenários que puderam ser analisados.

Com a implantação de novos sistemas de propulsão e mais eficientes para as partes interessadas, a tomada de decisão é um ramo fundamental para o mercado naval amazônico, que ainda está incipiente, mas prolonga fortes esforços para buscar formas de adquirir competitividade diante de mercados avançados. Diante disso, acredita-se que o processo adotado por este estudo contribuirá de forma veemente para uma melhor análise de um determinado sistema sob múltiplas perspectivas, proporcionando uma tomada de decisão simples, mas confiável. No entanto, a aplicação da estrutura MCDM adotada não se restringe a sistemas de propulsão ou áreas navais. Este método pode ser aplicado em várias outras áreas e produtos, em situações em que a tomada de decisão adequada é necessária.

## 9. REFERÊNCIAS

ADALI, E. A.; IŞIK, A. T. CRITIC and MAUT methods for the contract manufacturer selection problem. **European Journal of Multidisciplinary Studies**, v. 2, n. 5, p. 93–101, 2017.

**AGROSTAT: estatísticas de comercio exterior do agronegócio brasileiro.** Disponível em: <<http://sistemasweb.agricultura.gov.br/pages/AGROSTAT.html>>. Acesso em: 30 nov. 2018.

AHMAD ALINEJAD, E.; PISHVAEE, M. S.; BONYADI NAEINI, A. Key success factors for logistics provider enterprises: an empirical investigation in Iran. **Kybernetes**, v. 47, n. 3, p. 426–440, 5 mar. 2018a.

AHMAD ALINEJAD, E.; PISHVAEE, M. S.; BONYADI NAEINI, A. Key success factors for logistics provider enterprises: an empirical investigation in Iran. **Kybernetes**, v. 47, n. 3, p. 426–440, 5 mar. 2018b.

AHN, J. et al. Strategy for selecting an optimal propulsion system of a liquefied hydrogen tanker. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 8, p. 5366–5380, fev. 2017.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS DO MEIO AMBIENTE. **Medição de descarga líquida em grandes rios.** Brasília: Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica, 1 out. 2014. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2014/MedicaoDeDescargaLiquidaEmGrandesRiosManualTecnico2ed.pdf>>.

ANEC, A. N. DOS E. DE C. **Exportações Mensais de Soja em Grão por Porto de Embarque - 2017.** Brasília, DF, Brasil: [s.n.].

ANEC, A. N. DOS E. DE C. **Exportações Mensais de Soja em Grão por Porto de Embarque - 2018.** Brasília, DF, Brasil: [s.n.].

ANEC, A. N. DOS E. DE C. **Exportações Mensais de Soja em Grão por Porto de Embarque - 2019.** Brasília, DF, Brasil: [s.n.].

ANTAQ. **Hidroviás Brasileiras: Indicadores do Transportes de Cargas** Agência Nacional de Transportes Aquaviários, , 2012.

ANTAQ. **Caracterização da Oferta e da Demanda do Transporte Fluvial de Passageiros e Cargas na Região Amazônica**. Belém: Agência Nacional de Transporte Aquaviário, 2018a.

ANTAQ. **Anuário Estatístico Aquaviário - 2018**. Disponível em: <<http://web.antaq.gov.br/Anuario2016/>>. Acesso em: 10 dez. 2018b.

ANTAQ. **Boletim trimestral** Agência Nacional de Transportes Aquaviários, , 2019.

ARAÚJO, A. DE M. et al. A importância do modal hidroviário para a consolidação da operação do Arco Norte. 2018.

AWASTHI, A.; CHAUHAN, S. S.; OMRANI, H. Application of fuzzy TOPSIS in evaluating sustainable transportation systems. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 10, p. 12270–12280, 15 set. 2011.

BAFFOE, G. Exploring the utility of Analytic Hierarchy Process (AHP) in ranking livelihood activities for effective and sustainable rural development interventions in developing countries. **Evaluation and Program Planning**, v. 72, p. 197–204, fev. 2019a.

BAFFOE, G. Exploring the utility of Analytic Hierarchy Process (AHP) in ranking livelihood activities for effective and sustainable rural development interventions in developing countries. **Evaluation and Program Planning**, v. 72, p. 197–204, fev. 2019b.

BARROS, B.; CARVALHO, E.; PARANAIBA, A. **PROPOSTA DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA (GEE) NOS DESLOCAMENTOS URBANOS EM UMA GRANDE CIDADE BRASILEIRA COM A UTILIZAÇÃO DE HIDROVIA**. 24 jul. 2018.

BARROS, G. S. DE C. **MACRO/CEPEA: agronegócio soma 19 milhões de pessoas ocupadas, metade “dentro da porteira**, 2017. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/documentos/texto/macro-cepea-agronegocio-soma-19-milhoes-de-pessoas-ocupadas-metade-dentro-da-porteira.aspx>>. Acesso em: 22 fev. 2019

BARROS, M. J. B. De agrovila a nó logístico do agronegócio na Amazônia: o caso de Miritituba, Itaituba, Pará. **Geosul**, v. 34, n. 71, p. 382–406, 2019.

BASURKO, O. C.; MESBAHI, E. Methodology for the sustainability assessment of marine technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 68, p. 155–164, abr. 2014.

BEHZADIAN, M. et al. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. **European Journal of Operational Research**, v. 200, n. 1, p. 198–215, jan. 2010a.

BEHZADIAN, M. et al. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. **European Journal of Operational Research**, v. 200, n. 1, p. 198–215, jan. 2010b.

BENAYOUN, R.; ROY, B.; SUSSMAN, B. ELECTRE: Une méthode pour guider le choix en présence de points de vue multiples. **Note de travail**, v. 49, 1966.

BENEDIKTSSON, K.; WAAGE, E. R. H.; ZETA BOOKS. Taskscapes at Sea: Trawler Fishing and the Experience of Fluid Nature. **Environment, Space, Place**, v. 7, n. 2, p. 41–64, 2015.

BENÍTEZ, J. et al. Improving consistency in AHP decision-making processes. **Applied Mathematics and Computation**, v. 219, n. 5, p. 2432–2441, nov. 2012.

BENÍTEZ, J. et al. Consistent clustering of entries in large pairwise comparison matrices. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v. 343, p. 98–112, 1 dez. 2018.

BHATTACHARYYA, A.; KRASILNIKOV, V.; STEEN, S. Scale effects on open water characteristics of a controllable pitch propeller working within different duct designs. **Ocean Engineering**, v. 112, p. 226–242, jan. 2016.

BIALYSTOCKI, N.; KONOVESSIS, D. On the estimation of ship's fuel consumption and speed curve: A statistical approach. **Journal of Ocean Engineering and Science**, v. 1, n. 2, p. 157–166, abr. 2016.

BOLFE, É. L. **Visão 2030: O futuro da agricultura brasileira** Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, , 2018.

BRANS, J. P.; VINCKE, PH.; MARESCHAL, B. How to select and how to rank projects: The Promethee method. **European Journal of Operational Research**, v. 24, n. 2, p. 228–238, fev. 1986.

BRANS, J.-P. PROMETHEE METHODS. In: **L'Aide à la décision: nature, instruments et perspectives d'avenir**. Quebec, Canadá: [s.n.]. p. 183–214.

BULUT, E.; DURU, O. Analytic Hierarchy Process (AHP) in Maritime Logistics: Theory, Application and Fuzzy Set Integration. In: LEE, P. T.-W.; YANG, Z. (Eds.). . **Multi-Criteria Decision Making in Maritime Studies and Logistics**. Cham: Springer International Publishing, 2018. v. 260p. 31–78.

BUTDEE, S.; PHUANGSALEE, P. Uncertain risk assessment modelling for bus body manufacturing supply chain using AHP and fuzzy AHP. **Procedia Manufacturing**, Digital Manufacturing Transforming Industry Towards Sustainable Growth. v. 30, p. 663–670, 1 jan. 2019.

BUURMAN, J. **Supply chain logistics management**. [s.l.] McGraw-Hill, 2002.

CARIOU, P. Is slow steaming a sustainable means of reducing CO2 emissions from container shipping? **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 16, n. 3, p. 260–264, maio 2011.

CARLTON, J. **Marine Propellers and Propulsion**. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 2012.

CEPEA, C. DE E. A. EM E. A. **PIB do Agronegócio brasileiro de 1996 a 2018**. [s.l: s.n.].

CHADDAD, F. **Economia E Organização Da Agricultura Brasileira**. [s.l.] Elsevier Editora, 2017.

CHAI, M. et al. **Improvement in efficiency and reliability for diesel-electric propulsion based marine vessels using genetic algorithm**. 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). **Anais...IEEE**, 2016a.

CHAI, M. et al. **Improvement in efficiency and reliability for diesel-electric propulsion based marine vessels using genetic algorithm**. 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). **Anais...IEEE**, 2016b.

CHAND, P.; THAKKAR, J. J.; GHOSH, K. K. Analysis of supply chain complexity drivers for Indian mining equipment manufacturing companies combining SAP-LAP and AHP. **Resources Policy**, Sustainable management and exploitation of extractive waste: towards a more efficient resource preservation and waste recycling. v. 59, p. 389–410, 1 dez. 2018.

CHEN, K.; ZHAO, H.; XIAO, T. Outsourcing contracts and ordering decisions of a supply chain under multi-dimensional uncertainties. **Computers & Industrial Engineering**, v. 130, p. 127–141, 1 abr. 2019.

CHO, K. T. Multicriteria decision methods: An attempt to evaluate and unify. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 37, n. 9–10, p. 1099–1119, maio 2003.

CHRISTOPHER, M. **Logistics & supply chain management**. [s.l.] Pearson UK, 2016.

CID, R. S.; CID, N. G. A. Modal hidroviário: A contribuição da interligação entre as hidrovias tapajós e teles-pires no transporte de grãos. **Anais do Encontro Nacional de Pós Graduação**, v. 2, n. 1, p. 174–178, 2018.

CONAB. **Safra Brasileira de Grãos 2016/2017**. Brasília, DF - Brasil: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/web/portal/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>.

CONAB. **Série Histórica - Dashboard**. Disponível em: <<https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/index.php/safras/safra-serie-historica>>. Acesso em: 2 abr. 2019.

COSTA, A. S.; GOVINDAN, K.; FIGUEIRA, J. R. Supplier classification in emerging economies using the ELECTRE TRI-nC method: A case study considering sustainability aspects. **Journal of Cleaner Production**, v. 201, p. 925–947, nov. 2018.

DIAS, L. C. P. et al. Patterns of land use, extensification, and intensification of Brazilian agriculture. **Global Change Biology**, v. 22, n. 8, p. 2887–2903, ago. 2016.

DNIT. **ICM 2018**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://transportes.gov.br/ultimas-noticias/8035-dnit-divulga-avalia%C3%A7%C3%A3o-das-rodovias-federais-pavimentadas.html>>. Acesso em: 17 set. 2019.

DONG, Q.; COOPER, O. An orders-of-magnitude AHP supply chain risk assessment framework. **International Journal of Production Economics**, v. 182, p. 144–156, 1 dez. 2016.

DU, P.; OUAHSINE, A.; SERGENT, P. Influences of the separation distance, ship speed and channel dimension on ship maneuverability in a confined waterway. **Comptes Rendus Mécanique**, v. 346, n. 5, p. 390–401, maio 2018.

- DUARTE NETO, J. G. et al. Investments in a New Technological Infrastructure: Decision Making Using the ELECTRE-TRI Methodology. **Procedia Computer Science**, v. 122, p. 194–199, 2017.
- DURÁN-GRADOS, V. et al. The influence of the waterjet propulsion system on the ships' energy consumption and emissions inventories. **Science of The Total Environment**, v. 631–632, p. 496–509, ago. 2018.
- DWEIRI, F. et al. Designing an integrated AHP based decision support system for supplier selection in automotive industry. **Expert Systems with Applications**, v. 62, p. 273–283, nov. 2016.
- EMBRAPA. **Soja em números (safra 2018/19)**. Brasília, DF - Brasil: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/web/portal/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>.
- FAJARDO, A. P. **A utilização da Hidrovia Tapajós-Teles Pires para a exportação de Grãos do Mato Grosso**. [s.l.] ANTAQ, 2008.
- FAO. **FAOSTAT Statistical Database**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015.
- FIGUEIRA, J. R. et al. An Overview of ELECTRE Methods and their Recent Extensions: ELECTRE METHODS. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 20, n. 1–2, p. 61–85, jan. 2013.
- FIGUEIREDO, N. M.; BLANCO, C. J. C. Simulação de vazões e níveis de água médios mensais para o rio Tapajós usando modelos ARIMA. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 3, p. 111–126, 24 mar. 2014.
- FRANEK, J.; KRESTA, A. Judgment Scales and Consistency Measure in AHP. **Procedia Economics and Finance**, v. 12, p. 164–173, 2014.
- GAGGERO, S. et al. **A data-driven probabilistic learning approach for the prediction of controllable pitch propellers performance**. Proceedings of the 8th International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, MARINE. **Anais...**2019.

- GALO, N. R.; CALACHE, L. D. D. R.; CARPINETTI, L. C. R. A group decision approach for supplier categorization based on hesitant fuzzy and ELECTRE TRI. **International Journal of Production Economics**, v. 202, p. 182–196, ago. 2018.
- GASQUES, J. G. Sources of Growth in Brazilian Agriculture: Total Factor Productivity. **EuroChoices**, v. 16, n. 1, p. 24–25, abr. 2017.
- GEERTSMA, R. D. et al. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments. **Applied Energy**, v. 194, p. 30–54, maio 2017a.
- GEERTSMA, R. D. et al. Pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion: Modelling, validation and performance quantification. **Applied Energy**, v. 206, p. 1609–1631, nov. 2017b.
- GELDER, G. J. DE. **Tweede hybride binnenvaartschip is een feit - Groenervaren**. Disponível em: <<https://www.groenervaren.nl/tweede-hybride-binnenvaartschip/>>. Acesso em: 10 dez. 2018.
- GHIMIRE, L. P.; KIM, Y. An analysis on barriers to renewable energy development in the context of Nepal using AHP. **Renewable Energy**, v. 129, p. 446–456, dez. 2018.
- GIBBS, G. R. **Analyzing Qualitative Data**. [s.l.] SAGE, 2018.
- GIBBS, H. K. et al. Brazil's Soy Moratorium. **Science**, v. 347, n. 6220, p. 377–378, 23 jan. 2015.
- GOVINDAN, K.; JEPSEN, M. B. ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. **European Journal of Operational Research**, v. 250, n. 1, p. 1–29, abr. 2016.
- GUL, M. et al. A state of the art literature review of VIKOR and its fuzzy extensions on applications. **Applied Soft Computing**, v. 46, p. 60–89, 1 set. 2016.
- HA, M.-H.; YANG, Z.; LAM, J. S. L. Port performance in container transport logistics: A multi-stakeholder perspective. **Transport Policy**, v. 73, p. 25–40, 1 jan. 2019.
- HARPE, S. E. How to analyze Likert and other rating scale data. **Currents in Pharmacy Teaching and Learning**, v. 7, n. 6, p. 836–850, nov. 2015.

HOCHKIRCH, K.; BERTRAM, V. **Options for fuel saving for ships**. Mare Forum. **Anais...**2010.

HSIEH, M. et al. Application of HFACS, fuzzy TOPSIS, and AHP for identifying important human error factors in emergency departments in Taiwan. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 67, p. 171–179, 1 set. 2018.

HSU, C.-C.; LIOU, J. J. H. An outsourcing provider decision model for the airline industry. **Journal of Air Transport Management**, Selected papers from the 15th Air Transport Research Society Conference, Sydney, 2011. v. 28, p. 40–46, 1 maio 2013.

IMO - INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (EEOI)**, 17 jul. 2009.

ISHIZAKA, A.; LABIB, A. Review of the main developments in the analytic hierarchy process. **Expert Systems with Applications**, maio 2011.

JAFARZADEH, S.; SCHJØLBERG, I. Operational profiles of ships in Norwegian waters: An activity-based approach to assess the benefits of hybrid and electric propulsion. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 65, p. 500–523, dez. 2018.

JEANS, J. S. **Waterways and Water Transport in Different Countries**. [s.l.] BoD – Books on Demand, 2018.

JEONG, B. et al. Multi-criteria decision-making for marine propulsion: Hybrid, diesel electric and diesel mechanical systems from cost-environment-risk perspectives. **Applied Energy**, v. 230, p. 1065–1081, nov. 2018a.

JEONG, B. et al. Multi-criteria decision-making for marine propulsion: Hybrid, diesel electric and diesel mechanical systems from cost-environment-risk perspectives. **Applied Energy**, v. 230, p. 1065–1081, nov. 2018b.

JI, P.; ZHANG, H.; WANG, J. Selecting an outsourcing provider based on the combined MABAC–ELECTRE method using single-valued neutrosophic linguistic sets. **Computers & Industrial Engineering**, v. 120, p. 429–441, jun. 2018.

JOSÉ DONATO, C. et al. O SETOR DE AGRONEGÓCIOS E ALGUNS DE SEUS DESAFIOS. **COLLOQUIUM AGRARIAE**, v. 14, p. 38–42, 10 out. 2018.

KEEDI, S. **Logística de Transporte Internacional**. São Paulo, SP, Brasil: Aduaneiras, 2001.

KHVATOV, O.; DAR'ENKOV, A. A uniform power station of a transport unit with electric propulsion based on a diesel generator of varying rotation frequency. 2016.

KULAKOWSKI, K. Notes on order preservation and consistency in AHP. **European Journal of Operational Research**, v. 245, n. 1, p. 333–337, 2015.

KUMAR, A. et al. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p. 596–609, mar. 2017.

LACERDA, S. M. Navegação de cabotagem: Regulação ou política industrial? **BNDES Setorial**, p. 49–66, 2004.

LAMEIRA, P. I. D. **Capacidade de absorção de cluster industrial naval e análise da influência do processo de terceirização: um estudo de caso na região norte do Brasil**. Tese de doutorado—São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2019.

LAMEIRA, P. I. D.; BRAGA, E. M.; MORAES, H. B. Development of a product oriented by work breakdown structure and application of hull block construction method for inland barges. In: **Maritime Technology and Engineering**. London: [s.n.]. p. 361–404.

LEPORE, A. et al. A comparison of advanced regression techniques for predicting ship CO<sub>2</sub> emissions. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 33, n. 6, p. 1281–1292, out. 2017.

LI, A. et al. Application of Outlier Mining in Insider Identification Based on Boxplot Method. **Procedia Computer Science**, v. 91, p. 245–251, 2016.

LI, Q. A novel Likert scale based on fuzzy sets theory. **Expert Systems with Applications**, v. 40, n. 5, p. 1609–1618, abr. 2013.

LIAO, H.; XU, Z.; ZENG, X. Hesitant Fuzzy Linguistic VIKOR Method and Its Application in Qualitative Multiple Criteria Decision Making. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 23, n. 5, p. 1343–1355, out. 2015.

LIMA, H. A. M. Regulação do transporte aquaviário: o caso da hidrovía Solimões-Amazonas. 2017.

LIU, J. J. H.; TZENG, G.-H. Comments on “Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: an overview”. **Technological and Economic Development of Economy**, v. 18, n. 4, p. 672–695, 20 dez. 2012.

LIU, H.-C. et al. Induced aggregation operators in the VIKOR method and its application in material selection. **Applied Mathematical Modelling**, v. 37, n. 9, p. 6325–6338, 1 maio 2013.

MACHARIS, C. et al. PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 153, n. 2, p. 307–317, mar. 2004.

MARESCHAL, B.; BRANS, J. P. **The PROMETHEE-GAIA decision support system for multicriteria investigations**: ULB Institutional Repository. [s.l.] Université Libre de Bruxelles, 1994. Disponível em: <<https://ideas.repec.org/p/ulb/ulbeco/2013-9367.html>>. Acesso em: 17 jan. 2019.

MASUDA, T.; GOLDSMITH, P. World Soybean Production: Area Harvested, Yield, and Long-Term Projections. **International Food and Agribusiness Management Review**, v. 12, 1 jan. 2009.

MCGUIRK, P.; O’NEILL, P. Using questionnaires in qualitative human geography. **Faculty of Social Sciences - Papers**, p. 246–273, 1 jan. 2016.

MCKINNON, A. **Decarbonizing Logistics: Distributing Goods in a Low Carbon World**. [s.l.] Kogan Page Publishers, 2018.

MEDINA, A. C. et al. Análise da competitividade da indústria marítima brasileira e um panorama do setor de cabotagem no Brasil e no exterior: uma visão da indústria da construção naval brasileira e seus principais atores. **Análise da competitividade da indústria marítima brasileira e um panorama do setor de cabotagem no Brasil e no exterior**, 2010.

MELLO, J. A. N. D.; BARROS, W. G. Enchentes e vazantes do rio Negro medidas no porto de Manaus, Amazonas, Brasil. **Acta Amazonica**, v. 31, n. 2, p. 331–331, 2001.

MENESCAL, R. DE A. et al. **Boletim informativo aquaviário**. Brasília: Agência Nacional de Transporte Aquaviário (ANTAQ), 1 jan. 2016.

MIER, M.; CACHO, T. G. Soybean agri-food systems dynamics and the diversity of farming styles on the agricultural frontier in Mato Grosso, Brazil. **The Journal of Peasant Studies**, v. 43, n. 2, p. 419–441, 3 mar. 2016.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Projeções do agronegócio: Brasil 2018/19 a 2028/29**, 2019.

MOURA, D. A. DE; BOTTER, R. C. Análise da competitividade da indústria marítima Brasileira: associação dos fatores críticos de sucesso com suas dimensões. **Production**, v. 21, n. 4, p. 594–609, 12 ago. 2011.

MTPA - MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, PORTOS E AVIAÇÃO. **Plano Hidroviário Estratégico (PHE)**, 18 jun. 2015. Disponível em: <[http://observatorio.antaq.gov.br/wordpress/wp-content/uploads/2016/12/09\\_Plano\\_Hidroviario\\_Estrategico\\_PHE.pdf](http://observatorio.antaq.gov.br/wordpress/wp-content/uploads/2016/12/09_Plano_Hidroviario_Estrategico_PHE.pdf)>

MULLINER, E.; MALYS, N.; MALIENE, V. Comparative analysis of MCDM methods for the assessment of sustainable housing affordability. **Omega**, v. 59, p. 146–156, mar. 2016.

NAYYAR, D. BRICS, developing countries and global governance. **Third World Quarterly**, v. 37, n. 4, p. 575–591, 2 abr. 2016.

NETO, T. O.; NOGUEIRA, R. J. B. Os transportes e as dinâmicas territoriais no Amazonas. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia**, n. 43, 2019.

NIEKAMP, S. et al. A multi-criteria decision support framework for sustainable asset management and challenges in its application. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 32, n. 1, p. 23–36, 2 jan. 2015.

NUCHTUREE, C.; LI, T.; XIA, H. Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 134, p. 110145, 1 dez. 2020.

NYLUND, M. Construction of a hardware-in-the-loop simulator for Azipod control system testing. 2016.

OLIVEIRA, C. A.; BELDERRAIN, M. C. N. **CONSIDERAÇÕES SOBRE A OBTENÇÃO DE VETORES DE PRIORIDADES NO AHP.** . In: PRIMERA REUNIÓN REGIONAL BRASIL. Posadas, Argentina: 2008.

PANDEY, P. C.; KENGPOL, A. Selection of an automated inspection system using multiattribute decision analysis. **International Journal of Production Economics**, v. 39, n. 3, p. 289–298, maio 1995.

PAPALAMBROU, G. et al. Model Predictive Control for Hybrid Diesel-Electric Marine Propulsion \*\*Authors GP, ST, NK gratefully acknowledge the support of EC/DG RTD H2020/HERCULES-2 project, as well as the support of Lloyds Register Foundation, within the LRF NTUA Centre of Excellence in Ship Total Energy-Emissions-Economy, for the development and extension work on the hybrid integrated propulsion powertrain and related HIPPO-1 diesel electric test bed. Authors SS and KZ gratefully acknowledge the funding from the HERCULES-2 project, funded by the European Commission, DG Research, under Contract SCP1-GA-2011-284354. **IFAC-PapersOnLine**, 20th IFAC World Congress. v. 50, n. 1, p. 11064–11069, 1 jul. 2017.

PAULIDES, J. J. H. et al. Hybrid Propulsion Testing using Direct-Drive Electrical Machines for Super Yacht and Inland Shipping. **International Journal of Transportation Engineering and Technology**, v. 2(4), p. 42–48, 1 out. 2016a.

PAULIDES, J. J. H. et al. Hybrid Propulsion Testing using Direct-Drive Electrical Machines for Super Yacht and Inland Shipping. **International Journal of Transportation Engineering and Technology**, v. 2(4), p. 42–48, 1 out. 2016b.

PEREIRA, N. N. **Um estudo sobre instalações propulsoras para empurradores fluviais.** Dissertação de mestrado—São Paulo, SP, Brasil: Universidade de São Paulo, 2007.

RONCOLATO, M. Um panorama do transporte hidroviário no país. E por que não deslanchou. **Nexo**, 2018.

ROY, B. Un algorithme de classements fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples. **Cahiers du Centre d'Etudes de Recherche Opérationnelle**, v. 20, n. 1, p. 3–24, 1978.

ROY, B.; BERTIER, P. **La méthode ELECTRE II: une méthode de classement en présence de critères multiples**. [s.l: s.n.].

ROY, B.; BOUYSSOU, D. **Aide multicritère à la décision: méthodes et cas**. [s.l.] Economica Paris, 1993.

ROY, B.; HUGONNARD, J. C. Ranking of suburban line extension projects on the Paris metro system by a multicriteria method. **Transportation Research Part A: General**, v. 16, n. 4, p. 301–312, jul. 1982.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3–5, p. 161–176, 1987.

SAATY, T.; KULAKOWSKI, K. Axioms of the Analytic Hierarchy Process (AHP) and its Generalization to Dependence and Feedback: The Analytic Network Process (ANP). **arXiv preprint arXiv:1605.05777**, 2016.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, n. 3, p. 234–281, jun. 1977.

SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation**. New York ; London: McGraw-Hill International Book Co, 1980.

SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, n. 1, p. 9–26, set. 1990.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, n. 1, p. 83, 2008.

SARUL, L. S.; EREN, Ö. The comparison of MCDM Methods including AHP, TOPSIS and MAUT with an Application on Gender Inequality Index. **European Journal of Interdisciplinary Studies**, v. 2, n. 2, p. 183–196, 2016.

SENNAROGLU, B.; VARLIK CELEBI, G. A military airport location selection by AHP integrated PROMETHEE and VIKOR methods. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 59, p. 160–173, mar. 2018.

SENS, M. Avanços tecnológicos nos motores elétricos. **Revista WEG**, v. 1, n. 1, p. 11–13, 2001.

SEO, Y.-J.; DINWOODIE, J.; ROE, M. The influence of supply chain collaboration on collaborative advantage and port performance in maritime logistics. **International Journal of Logistics Research and Applications**, v. 19, n. 6, p. 562–582, 1 nov. 2016.

SETYO KOENHARDONO, E.; AMIADJI. Comparative of Feasibility Study Between Diesel Mechanical Propulsion System and Combination of Diesel Engine and Electric Motor Propulsion System on Offshore Patrol Vessel (OPV) 80 m. **MATEC Web of Conferences**, v. 177, p. 01011, 2018.

SHAHROODI, K. et al. **Application of Analytical Hierarchy Process (AHP) Technique to Evaluate and Selecting Suppliers in an Effective Supply Chain**. 2012.

SHAHSAVARI, M. H.; KHAMEHCHI, E. Optimum selection of sand control method using a combination of MCDM and DOE techniques. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 171, p. 229–241, dez. 2018.

SHIGUNOV, V. Assessment of Maneuverability in Waves. **Journal of Ship Research**, v. 63, n. 2, p. 78–93, 2019.

SILAS, S.; RAJSINGH, E. B.; EZRA, K. Efficient Service Selection Middleware using ELECTRE Methodology for Cloud Environments. **Information Technology Journal**, v. 11, n. 7, p. 868–875, 1 jul. 2012.

SILVA JUNIOR, A. J. DA. **Panorama do transporte de cargas no Brasil e seu escoamento pelos portos brasileiros**. B.S. thesis—[s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

SILVA, K. S. **Logística brasileira: Um estudo teórico do modal aquaviário (cabotagem)**. Trabalho de conclusão de curso—João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2015.

SITORUS, F.; CILLIERS, J. J.; BRITO-PARADA, P. R. Multi-criteria decision making for the choice problem in mining and mineral processing: Applications and trends. **Expert Systems with Applications**, v. 121, p. 393–417, maio 2019.

SMITH, A. **An Inquiry Into the Nature and Causes of the Wealth of Nations**. [s.l.] W. Strahan and T. Cadell, 1776.

SMITH, T. Technical energy efficiency, its interaction with optimal operating speeds and the implications for the management of shipping's carbon emissions. **Carbon Management**, v. 3, n. 6, p. 589–600, dez. 2012.

SMITH, T. W. P. et al. Third IMO Greenhouse Gas Study 2014. abr. 2015.

SOLEM, S. et al. Optimization of diesel electric machinery system configuration in conceptual ship design. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 20, n. 3, p. 406–416, 1 set. 2015.

SONER, O.; AKYUZ, E.; CELIK, M. Use of tree based methods in ship performance monitoring under operating conditions. **Ocean Engineering**, v. 166, p. 302–310, out. 2018.

SOUSA, R. A.; LEOPOLDINO, C. B. Avaliação da cabotagem como opção de modal logístico: estudo de caso de uma metalúrgica nordestina. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, v. 13, n. 3, p. 295, 2018.

SUGIYAMA, A. et al. Do soybeans select specific species of Bradyrhizobium during growth? **Communicative & Integrative Biology**, v. 8, n. 1, p. e992734, 2 jan. 2015.

TALLURI, L. et al. Techno economic and environmental assessment of wind assisted marine propulsion systems. **Ocean Engineering**, v. 121, p. 301–311, jul. 2016.

TEIXEIRA, C. A. N. et al. Brazilian inland navigation. **BNDES Setorial**, n. 47, p. 437–482, 30 mar. 2018.

TRAN, T. A. A research on the energy efficiency operational indicator EEOI calculation tool on M/V NSU JUSTICE of VINIC transportation company, Vietnam. **Journal of Ocean Engineering and Science**, v. 2, n. 1, p. 55–60, 1 mar. 2017.

URRY, J. **Mobilities: New Perspectives on Transport and Society**. [s.l.] Routledge, 2016.

USDA. **Brazil: Exporter Guide** USDA Foreign Agricultural Service, , 2019. Disponível em: <[https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/report/downloadreportbyfilename?filename=Exporter%20Guide\\_Sao%20Paulo%20ATO\\_Brazil\\_4-4-2019.pdf](https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/report/downloadreportbyfilename?filename=Exporter%20Guide_Sao%20Paulo%20ATO_Brazil_4-4-2019.pdf)>

VALE, L.; MONAI, R. **Arco Norte: Um desafio logístico**: Estudos Estratégicos. [s.l.] Câmara dos deputados, 2016.

VIMMERSTEDT, L. et al. Potential Reductions in Emissions and Petroleum Use in Transportation: Perspectives from the Transportation Energy Futures Project. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2375, n. 1, p. 37–44, jan. 2013.

VINCKE, P. **L'aide multicritère à la décision**. BruxellesParis: Ed. de l'Université de BruxellesEllipses, 1992.

WADGAVE, U.; KHAIRNAR, M. R. Parametric tests for Likert scale: For and against. **Asian Journal of Psychiatry**, v. 24, p. 67–68, dez. 2016.

WIND, Y.; SAATY, T. L. Marketing Applications of the Analytic Hierarchy Process. **Management Science**, v. 26, n. 7, p. 641–658, jul. 1980.

WOUD, H. K.; STAPERSMA, D. **Design of Propulsion and Electric Power Generation Systems**. [s.l.] IMarEST, Institute of Marine Engineering, Science and Technology, 2002a.

WOUD, H. K.; STAPERSMA, D. **Design of Propulsion and Electric Power Generation Systems**. [s.l.] IMarEST, Institute of Marine Engineering, Science and Technology, 2002b.

WYNSTRA, R. J.; PROGRAM, I. S. **The Soybean Solution: Meeting World Food Needs**. [s.l.] INTSOY, College of Agriculture, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1986.

XIAO, N. et al. Study on Vibration of Marine Diesel-Electric Hybrid Propulsion System. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2016, p. 1–9, 2016.

YE LI et al. **Improving Ship Maneuverability Standards as a Means for Increasing Ship Controllability and Safety**. Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE. **Anais...** In: OCEANS 2005 MTS/IEEE. Washington, DC, USA: IEEE, 2005. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1640048/>>. Acesso em: 12 mar. 2020

YU, W. ELECTRE TRI(aspects méthodologiques et manuel d'utilisation). **Document-Université de Paris-Dauphine, LAMSADE**, 1992.

ŽAK, J.; KRUSZYŃSKI, M. Application of AHP and ELECTRE III/IV Methods to Multiple Level, Multiple Criteria Evaluation of Urban Transportation Projects. **Transportation Research Procedia**, v. 10, p. 820–830, 2015.

ZAVADSKAS, E. K.; TURSKIS, Z. Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: an overview / Daugiatiksliai sprendimų priėmimo metodai ekonomikoje: apžvalga. **Technological and Economic Development of Economy**, v. 17, n. 2, p. 397–427, 24 jun. 2011.

ZHANG, H. et al. The evaluation of tourism destination competitiveness by TOPSIS & information entropy – A case in the Yangtze River Delta of China. **Tourism Management**, v. 32, n. 2, p. 443–451, 1 abr. 2011.

ZHAO, F. et al. Power management of vessel propulsion system for thrust efficiency and emissions mitigation. **Applied Energy**, v. 161, p. 124–132, jan. 2016.

ZHOU, Y.; PAZOUKI, K.; NORMAN, R. The modelling and three-level control of a hybrid propulsion system for a green ice-capable ship. **Journal of Cleaner Production**, v. 296, p. 126577, 10 maio 2021.