



Escola Superior  
de Tecnologia da UEA

ANÁLISE TÉCNICA-ECONÔMICA DO USO DO GNL EM EMBARCAÇÕES DO  
TIPO FERRYBOAT QUE OPERAM NO RIO SOLIMÕES

Polyana Izel da Silva

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Naval da Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Estado do Amazonas, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheira Naval.

Orientador: Ricardo Homero Ramírez Gutiérrez

Manaus – AM  
Dezembro de 2023

Análise Técnica-Econômica do Uso do GNL em Embarcações do Tipo  
Ferryboat que Operam no Rio Solimões

Polyana Izel da Silva

PROJETO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
NAVAL APRESENTADO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NAVAL DA  
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA, UEA, COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE BACHAREL EM ENGENHEIRA  
NAVAL.

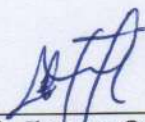
Examinada por:



Prof. Ricardo Homero Ramirez Gutierrez, D.Sc.



Prof. Marina Aranha de Sousa, M.Sc.



Prof. Elvis Jhoarsy Osorio Santander, D.Sc.



Prof. Jassiel Vladimir Hernandez Fontes, D.Sc.

MANAUS – AM  
DEZEMBRO DE 2023

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
**Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.**

S586a Silva, Polyana Izel da  
Análise técnica-econômica do uso do GNL em  
embarcações do tipo ferryboat que operam no Rio Solimões  
/ Polyana Izel da Silva. Manaus : [s.n], 2023.  
66 f.: color.; 30 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Naval - Universidade  
do Estado do Amazonas, Manaus, 2023.

Inclui bibliografia

Orientador: Gutiérrez, Ricardo Homero Ramírez

1. Ferryboat movido a GNL. 2. Consumo de  
combustível. 3. Estabilidade Intacta. 4. Navegação  
interior. I. Gutiérrez, Ricardo Homero Ramírez (Orient.).  
II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Análise  
técnica-econômica do uso do GNL em embarcações do tipo  
ferryboat que operam no Rio Solimões

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus, que foi o meu alicerce constante durante toda a graduação. Agradeço ao meu pai, Arionaldo Ataíde da Silva, que foi meu suporte e incentivador, sempre estando ao meu lado para nunca desistir. Também à minha mãe, Nilma Izel da Silva, que apoiou as minhas decisões e teve compreensão todos os dias em que precisei me dedicar aos trabalhos da faculdade. Da mesma forma, ao meu irmão e à minha sobrinha, que foram compreensivos com os meus horários de estudo.

Agradeço aos meus amigos que compartilharam a experiência de cursar engenharia naval comigo, que sem eles, não teria chegado tão longe. Agradeço também a todas as mulheres que vieram antes de mim na área de exatas e estiveram sozinhas em sala de aula, pela coragem em quebrar barreiras.

Ao meu orientador, Ricardo Homero Ramírez Gutiérrez, agradeço pela paciência, compreensão e contribuição para o resultado deste trabalho, assim como pelo incentivo a melhorar meu senso crítico, tanto no âmbito acadêmico quanto no profissional. Juntamente, agradeço à professora Marina Aranha de Sousa por todas as orientações que tive durante as minhas iniciações científicas e seu inestimável apoio. Também expressei minha gratidão a todos os professores do curso de engenharia naval e aqueles com quem tive aula pela contribuição à minha formação acadêmica.

Agradeço à minha equipe de nautimodelismo Jaraqui, por todo o conhecimento transmitido e pelas experiências nas quais pude participar na construção dos modelos, bem como pela oportunidade de competir no Duna.

Agradeço ainda ao Ricardo Almeida Sanches pela contribuição no objeto de estudo e ao Luiz Paulo Machado pela compreensão, oportunidade e confiança que me deu para trabalhar em uma empresa onde sempre desejei atuar.

Resumo do Projeto de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Naval da Escola Superior de Tecnologia, UEA, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Naval.

## ANÁLISE TÉCNICA-ECONÔMICA DO USO DO GNL EM EMBARCAÇÕES DO TIPO FERRYBOAT QUE OPERAM NO RIO SOLIMÕES

Polyana Izel da Silva

Dezembro/2023

Orientador: Ricardo Homero Ramírez Gutiérrez

Departamento: Engenharia Naval

A utilização do Gás Natural Liquefeito (GNL) como combustível para embarcações é uma realidade no cenário mundial, sendo uma alternativa sustentável que permite a redução das emissões de gases poluentes ao meio ambiente. Assim, este estudo analisa duas opções de instalação do tanque de GNL em um *ferryboat* de passageiros e carga que navega no Rio Solimões entre as cidades de Manaus e Tabatinga.

O dimensionamento dos tanques de GNL para esse *ferryboat* é baseado no consumo de diesel do motor instalado e na proporção das misturas para possibilitar a substituição do óleo diesel por GNL. Como resultado, a opção que se apresentou mais viável seria a embarcação realizar a viagem a montante do rio com apenas GNL e a viagem de regresso utilizando o óleo diesel como combustível. Essa escolha não apenas se mostrou economicamente viável, com um aumento de 4,03% no lucro por viagem, mas também evita que o armador perca espaço de carga e reduza o frete da embarcação.

Esse resultado é relevante para o trabalho, uma vez que possibilitaria a redução dos fretes e das passagens para os ribeirinhos. Além disso, devido à nova configuração das disposições dos tanques, realizou-se o estudo de estabilidade intacta, de forma a garantir a navegação segura. Os resultados da estabilidade em cada condição de carregamento atenderam a todos os critérios estabelecidos pela NORMAM 202.

Abstract of the Course Conclusion Project presented to the Department of Naval Engineering of the Technology School as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor in Naval (B.Sc.)

TECHNICAL-ECONOMIC ANALYSIS OF LNG USAGE IN FERRYBOAT-TYPE  
VESSELS OPERATING ON THE SOLIMÕES RIVER

Polyana Izel da Silva

December/2023

Advisor: Ricardo Homero Ramírez Gutiérrez

Department: Naval Engineering

The use of Liquefied Natural Gas (LNG) as a fuel for vessels is a reality on the global stage, representing a sustainable alternative that enables the reduction of emissions of pollutants into the environment. Thus, this study examines two options for installing LNG tanks on a passenger and cargo ferry that navigates the Solimões River between the cities of Manaus and Tabatinga.

The sizing of LNG tanks for this ferry is based on the diesel consumption of the installed engine and the mixture ratios to enable the replacement of diesel with LNG. As a result, the most viable option was for the vessel to make the upstream journey using only LNG and the return journey using diesel as fuel. This choice not only proved to be economically viable, with a 4.03% increase in profit per trip, but also prevents the shipowner from losing cargo space and reducing the vessel's freight.

This outcome is relevant to the study, as it would allow for a reduction in freight and passage costs for riverside communities. Additionally, due to the new configuration of the tank arrangements, a study of intact stability was conducted to ensure safe navigation. The stability results under each loading condition met all criteria established by NORMAM 202.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Reservas provadas de gás natural.....	12
Figura 1.2. Preço do diesel. ....	13
Figura 1.3. Fluxograma da metodologia.....	15
Figura 3.1. As condições de estabilidade intacta.....	23
Figura 3.2. Braço de restauração. ....	26
Figura 3.3. Critérios de Estabilidade. ....	29
Figura 4.1. <i>Ferryboat</i> . ....	33
Figura 4.2. Vista do fundo do <i>ferryboat</i> . ....	34
Figura 4.3. Curva de consumo de combustível do motor Yanmar 6AYW-WET .....	35
Figura 4.4. Curva de potência de saída do motor Yanmar 6AYW-WET.....	35
Figura 4.5. Itinerário do <i>ferryboat</i> .....	36
Figura 5.1. Disposição dos tanques de GNL para a opção A. ....	41
Figura 5.2. Disposição dos tanques de GNL para a opção B. ....	41
Figura 5.3. Curva de estabilidade estática da condição 1, na opção A.....	44
Figura 5.4. Curva de estabilidade estática da condição 2, na opção A.....	45
Figura 5.5. Curva de estabilidade estática da condição 3, na opção A.....	46
Figura 5.6. Curva de estabilidade estática da condição 4, na opção A.....	47
Figura 5.7. Curva de estabilidade estática da condição 5, na opção A.....	48
Figura 5.8. Curva de estabilidade estática da condição 6, na opção A.....	49
Figura 5.9. Curva de estabilidade da condição 1, na opção B.....	51
Figura 5.10. Curva de estabilidade da condição 2, na opção B.....	52
Figura 5.11. Curva de estabilidade da condição 3, na opção B.....	53
Figura 5.12. Curva de estabilidade da condição 4, na opção B.....	54
Figura 5.13. Curva de estabilidade da condição 5, na opção B.....	55
Figura 5.14. Curva de estabilidade da condição 6, na opção B.....	56
Figura 5.15. Arranjo dos tanques para a opção B.....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Valores de k .....	25
Tabela 4.1. Características Principais da Embarcação .....	34
Tabela 4.2. Linha de atuação subindo o rio.....	37
Tabela 4.3. Linha de atuação descendo o rio.....	37
Tabela 5.1. Modos de operação do <i>ferryboat</i> . .....	38
Tabela 5.2. Massa do óleo diesel.....	39
Tabela 5.3. Volumes necessários para os diferentes combustíveis. ....	39
Tabela 5.4. Dimensões principais dos tanques de GNL.....	41
Tabela 5.5. Capacidades da embarcação funcionando com GNL. ....	42
Tabela 5.6. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 1, na opção A. ....	44
Tabela 5.7. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 2, na opção A. ....	45
Tabela 5.8. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 3, na opção A. ....	46
Tabela 5.9. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 4, na opção A. ....	47
Tabela 5.10. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 5, na opção A. ...	48
Tabela 5.11. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 6, na opção A. ...	49
Tabela 5.12. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 1, na opção B. ...	51
Tabela 5.13. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 2, na opção B. ...	52
Tabela 5.14. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 3, na opção B. ...	53
Tabela 5.15. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 4, na opção B. ...	54
Tabela 5.16. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 5, na opção B. ...	55
Tabela 5.17. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 6, na opção B. ...	56
Tabela 5.18. Custo atual com diesel. ....	57
Tabela 5.19. Custo de combustível para as opções A e B. ....	57
Tabela 5.20. Lucro das opções A e B. ....	58
Tabela 5.21. Fabricantes de motores duplo combustível. ....	59



## LISTA DE SIGLAS

ANP	Agência nacional do petróleo
BOG	Gás vaporizado ( <i>boil-off gas</i> )
ECA	Área de controle de emissões ( <i>Emission control areas</i> )
GM	Altura metacêntrica
GN	Gás natural
GNL	Gás natural liquefeito
GNV	Gás natural veicular
HFO	Óleo combustível pesado
NORMAM	Normas da Autoridade Marítima
ODM	Óleo diesel marítimo
SIMOPs	Análise de riscos para as operações simultâneas

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Contextualização .....	11
1.2	Justificativa.....	13
1.3	Objetivos.....	14
1.4	Metodologia.....	14
1.5	Organização do trabalho.....	16
2	ESTADO DA ARTE .....	17
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	22
3.1	Estabilidade intacta.....	22
3.2	Critérios de estabilidade e condições de carregamento da NORMAM 202.....	28
3.3	Consumo de combustível e dimensionamento do tanque.....	31
3.4	Código IGF.....	31
3.5	Viabilidade econômica .....	32
4	ESTUDO DE CASO .....	33
4.1	Características da embarcação.....	33
4.2	Estudo da rota .....	36
5	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	38
5.1	Dimensionamento do tanque de GNL .....	38
5.2	Disposição do tanque de GNL.....	40
5.3	Avaliação dos critérios de estabilidade intacta.....	41
5.4	Viabilidade econômica .....	57
5.5	Recomendação de Motor Bicomcombustível.....	58
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS ...	60
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	62
	ANEXO A – ARRANJO GERAL DOS CONVESES .....	64
	ANEXO B – TABELA DE CAPACIDADES DO <i>FERRYBOAT</i> .....	66

# 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho apresenta um estudo sobre a análise da viabilidade técnica e econômica na conversão de uma embarcação do tipo *ferryboat*, que navega no Rio Solimões entre as cidades de Manaus e Tabatinga, no estado do Amazonas, e que é movida a óleo diesel, para o uso de Gás Natural Liquefeito (GNL) na forma bicomcombustível.

A aplicação dessa proposta na navegação interior no estado do Amazonas apresenta dificuldades a serem superadas, mas mostra que há grande potencial de implementação. Visto que o transporte aquaviário no estado que representa o principal modal para a movimentação de pessoas e cargas, que de acordo com o último relatório técnico da ANTAQ (2017) apresentou a movimentação de 1,6 milhões de passageiros por ano e um milhão de toneladas de carga anualmente, em conjunto com a exploração do gás natural (GN) na região.

Este estudo inclui aspectos técnicos, de segurança, ambientais e econômicos, aplicados aos dados fornecidos de uma embarcação de passageiros e cargas. De modo que a análise de viabilidade da utilização de GNL como combustível apresente aos armadores da região a opção de um combustível alternativo. Além disso, o estudo é de grande importância, considerando que a utilização de GNL como combustível é vista como uma alternativa mais econômica e ambientalmente sustentável para o transporte fluvial.

## 1.1 Contextualização

Nos últimos anos, questões ambientais e de sustentabilidade têm dominado o debate sobre a gestão dos recursos naturais. Nesse contexto, o Brasil está empenhado na corrida em direção à transição energética, propondo alternativas mais sustentáveis para diversos processos. Uma dessas opções discutidas é o GN, que de acordo com o anuário da ANP (2023), o Brasil ocupou a 31ª posição entre os produtores mundiais desse recurso, apresentando uma produção de 23 bilhões de m<sup>3</sup>, o que corresponde a 0,6% da produção global.

O anuário da ANP (2023) também apresenta as reservas provadas por estado brasileiro, assim o estado do Amazonas possui uma reserva de 42,011 bilhões de m<sup>3</sup> em

terra, representando 10,4% de reservas do Brasil e estando atrás apenas do estado do Rio de Janeiro que possui 62,8%, como apresentado na Figura 1.1.

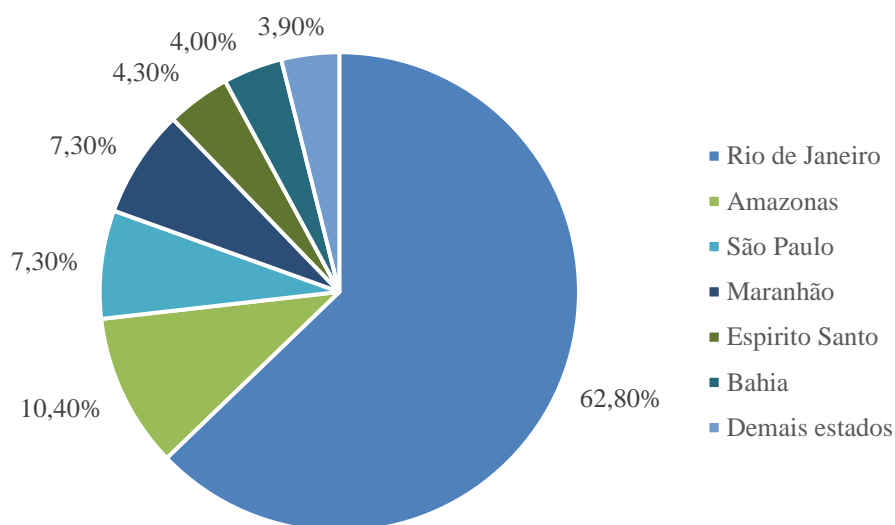


Figura 1.1. Reservas provadas de gás natural.  
Fonte: ANP (2023).

A principal operadora de GN no estado do Amazonas é a Eneva com uma unidade de tratamento no campo de Azulão, que contribui para a produção do estado marcada com 5,1 bilhões de m<sup>3</sup>. No entanto, o anuário da ANP (2023) destaca que no Amazonas foram reinjetados 2,462 bilhões de m<sup>3</sup> de GN.

Nesse contexto, no setor de transporte aquaviário são crescentes as discussões para a redução das emissões de gases poluentes, que representam uma grande fonte de impacto ambiental. Em busca de alternativas mais limpas, diversas empresas têm investido na adoção de combustíveis mais sustentáveis, visto que de acordo com o Arefin et al. (2020) e Seung-Man Ha e Kang (2020) o GNL é um modo mais preferível para o transporte em longas distâncias do GN, devido ao seu processo de liquefação que é mantido em uma temperatura de -163°C reduzindo o seu volume em 1/600 vezes e facilitando o transporte e armazenamento do gás.

Segundo a DNV (2023), o GNL contribui com a redução de 95% de SO<sub>x</sub>, 20% de NO<sub>x</sub> e 14% de CO<sub>2</sub> que são gases nocivos para o meio ambiente. De modo que foram registrados no ano de 2021 a operação de 221 navios movidos a GNL, e pedidos confirmados para mais de 359, sendo embarcações novas para a construção. Assim, embarcações que utilizam GNL como combustível tendem a emitir consideravelmente

menos poluentes atmosféricos do que aquelas movidas a óleo diesel ou óleo pesado *bunker*.

Além das vantagens ambientais, o uso do GNL como combustível apresenta vantagem financeira, visto que pela Figura 1.2 o preço do óleo diesel apresenta tendência de crescimento ao longo dos anos. No entanto, a adoção do GNL como combustível envolve uma série de questões técnicas e de infraestrutura que precisam ser levadas em conta.



Figura 1.2. Preço do diesel.  
Fonte: Poder360 (2022).

## 1.2 Justificativa

A aplicação do GNL como combustível alternativo em embarcações do tipo *ferryboat* é uma proposta devido às suas grandes dimensões, sendo capaz de dispor espaço para a instalação dos tanques criogênicos. Além disso, aplicar o estudo em uma embarcação que navega no Rio Solimões, apresenta vantagem em relação a alta movimentação de passageiros e cargas, entre as cidades localizadas as margens do rio. Somado a isso a rota tem elevado investimento com a exploração do GN em Ucuru, na cidade de Coari (AM).

O GNL como combustível reduz as emissões de poluentes e apresenta viabilidade econômica em relação aos custos de combustível comparado com os motores operando com óleo diesel. Nesse contexto, propor a utilização do gás em motores de propulsão

contribui para o avanço desse tópico por meio da análise de conversão de um *ferryboat* que opera na rota de Manaus a Tabatinga.

### **1.3 Objetivos**

O objetivo principal do trabalho é avaliar a possibilidade de conversão de *ferryboats* movidos a óleo diesel para a utilização de GNL na forma bicomcombustível. Esse objetivo vem ao encontro da necessidade de promover a adoção de alternativas mais eficientes e sustentáveis que reduzam as emissões de gases ao meio ambiente. Além de propor a redução nos custos de combustível comparando o consumo do óleo diesel e do GNL.

O estudo busca avaliar as possibilidades e desafios de adotar o tanque de GNL na embarcação, em vista de minimizar o impacto na capacidade de transportar carga e a segurança dos passageiros. Conhecendo os pontos de parada que a embarcação faz para determinar as condições de operação para a utilização do GNL na forma de combustível.

O trabalho também tem como objetivo de realizar um código em MATLAB para realizar o cálculo de estabilidade intacta para avaliar os critérios de estabilidade exigidos pela NORMAM 202/DPC (2023) e aplicados para a navegação interior, como forma independente de realizar os cálculos por software comercial.

### **1.4 Metodologia**

O presente trabalho visa analisar a viabilidade de aplicação de tanques de GNL como combustível principal em embarcações de passageiros da Região Norte. A metodologia aplicada para atingir os objetivos propostos são apresentadas na Figura 1.3 que compreende o procedimento aplicado no estudo de caso. Importante ressaltar que o dimensionamento dos tanques de GNL foram calculados por meio do consumo de óleo diesel atual.

Para o estudo de estabilidade intacta foi desenvolvido uma ferramenta computacional no software MATLAB para aplicar os critérios que a NORMAM 202/DPC (2023) exige para embarcações de passageiros e cargas que operam na navegação interior, a fim de ser independente de softwares comerciais. Por fim, foram calculados a receita e os custos de combustível para avaliar a viabilidade econômica da embarcação.

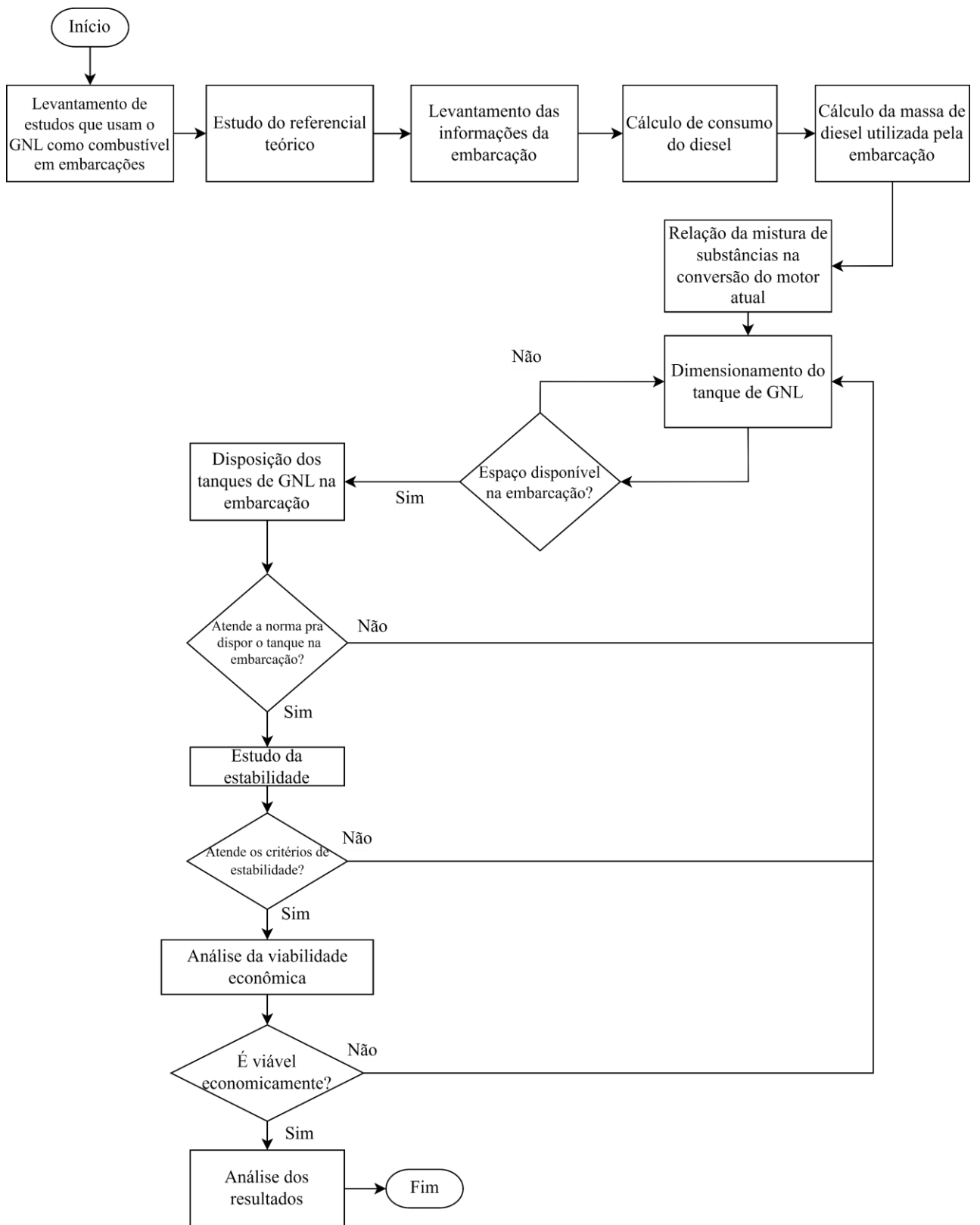


Figura 1.3. Fluxograma da metodologia.

## **1.5 Organização do trabalho**

No capítulo 2, são apresentados os estudos atuais sobre a aplicação de GNL como combustível de embarcações.

No capítulo 3, apresenta-se a fundamentação teórica que inclui o cálculo de estabilidade intacta para grandes ângulos de inclinação, os critérios de estabilidade para cada condição de carregamento, o dimensionamento dos tanques de GNL e as considerações para a viabilidade econômica.

No capítulo 4, é apresentada a embarcação que foi utilizada para o estudo de caso, assim como as características da rota que a embarcação navega.

No capítulo 5, apresenta-se a análise de resultados, com relação ao estudo de estabilidade e viabilidade econômica.

No capítulo 6, são feitas as conclusões do trabalho e apresenta-se recomendações para trabalhos futuros.

Por fim, no capítulo 7 mostra-se as referências bibliográficas utilizadas para embasar o trabalho.



## 2 ESTADO DA ARTE

A pesquisa realizada por Jafarzadeh et al. (2017) apresenta uma abordagem de engenharia de sistemas com o objetivo de auxiliar armadores e projetistas de embarcações de pesca a tomarem decisões em relação ao uso de GNL como combustível e aos custos associados. Assim, identificaram as necessidades dos stakeholders, estabelecimento de medidas de efetividade, análise de riscos e implementação do sistema. A utilização do GNL como combustível pode ser uma solução promissora do ponto de vista ambiental, mas com desafios técnicos, de segurança e custo. A conclusão aponta que a abordagem sistêmica pode ajudar a compatibilizar as diferentes necessidades e objetivos envolvidos na decisão de implementar um sistema de propulsão a gás em embarcações de pesca.

Segundo Fokkema, Buijs e Vis (2017) com as regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas, o GNL tornou-se uma opção de combustível alternativo. Assim, para avaliar os investimentos de embarcações convencionais e movidas a GNL, criaram um método de avaliação que considerou custos de combustível e operacionais sob preços estatísticos, áreas controladas por emissões e distâncias de rotas. Os resultados indicam que o custo do GNL frequentemente é menor, mesmo com preços desfavoráveis. No entanto, os custos iniciais mais elevados de navios com GNL nem sempre se traduzem em custos totais mais altos. O estudo identificou condições em que os custos totais de operação de navios a GNL superam os convencionais, destacando que a escolha depende de diversos fatores, como preço relativo do GNL, distâncias de viagem e custo de capital.

O autor Yoo (2017) apresenta uma avaliação econômica para o uso do GNL como combustível marítimo, comparado ao uso de óleo diesel marítimo (ODM). O objetivo é investigar a viabilidade econômica do uso de GNL e fornece informações sobre as condições de negócios futuras. A pesquisa incluiu uma análise comparativa de custos entre os combustíveis, considerando parâmetros importantes como o custo do combustível, o custo do sistema de combustível de GNL e o custo de distribuição de pequenas quantidades de GNL. Os resultados mostram que o uso de GNL como combustível marítimo pode ser economicamente viável em determinadas condições de negócios. Concluíram que o uso de GNL pode ser uma opção atraente para reduzir as emissões e cumprir as áreas de controle de emissões de enxofre.

No estudo de Yang et al. (2018) apresentaram que o uso do GNL como combustível de embarcações tem sido cada vez mais explorado como uma alternativa

mais limpa e eficiente em relação aos combustíveis fósseis convencionais. O objetivo deste estudo foi avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso do GNL em embarcações, considerando aspectos como desempenho, emissões e custos. De modo que realizaram uma análise de dados de testes em laboratório e em campo, bem como a simulação computacional de diferentes cenários de operação. Os resultados indicaram que o uso do GNL pode reduzir significativamente as emissões de poluentes atmosféricos, além de proporcionar maior eficiência energética e menor custo operacional em longo prazo. Assim, o GNL tem potencial para a implementação, mas requer investimentos e políticas públicas adequadas.

Wan et al. (2019) apresenta o cenário mundial a respeito de navios movidos a GNL, tanto construídos quanto convertidos, a fim de mensurar o nível de seu desenvolvimento. Utilizando o processo de Análise de Hierarquia (AHP), propuseram um modelo de avaliação que foi validado por meio de um estudo de caso comparativo entre China, Noruega e Estados Unidos. Os resultados indicam que a Noruega é o país com o nível de desenvolvimento mais avançado em navios movidos a GNL. Os resultados obtidos forneceram subsídios relevantes para a formulação de políticas públicas em relação ao desenvolvimento de navios movidos a GNL.

O estudo de Merien-Paul, Enshaei e Jayasinghe (2019) apresenta uma análise das emissões e custos de combustível de um navio graneleiro movido a óleo combustível pesado (HFO) na rota Japão a Holanda. Durante trinta meses coletou dados de consumo de combustível do HFO em situações reais de navegação, considerando aspectos específicos dos componentes de processos que demandam energia e requisitos operacionais. Os resultados indicaram que o uso de GNL como combustível pode reduzir ainda mais as emissões em comparação com o HFO, enquanto o custo da tripulação para o uso de GNL aumentou em 10%. Assim, a comparação entre as alternativas deve levar em consideração as demandas operacionais do navio, não se limitando à utilização de fatores de conversão de energia, e destaca-se o aumento no consumo de óleo lubrificante com o uso de GNL.

O estudo de Lee, Yoo e Huh (2020) destaca os benefícios econômicos do uso de GNL como combustível para navios que transportam farinha importada na Coreia do Sul. O objetivo do estudo foi analisar a disposição do público em pagar por produtos importados em navios movidos a GNL, utilizando o método de valor contingente. Os resultados mostraram que a média adicional foi de USD 0,51/ kg. A metodologia incluiu

uma revisão da literatura sobre o uso de GNL em navios e a análise dos dados coletados por meio de questionários. A conclusão do estudo é que o uso de GNL como combustível para navios pode trazer benefícios econômicos significativos e reduzir a poluição do ar.

Os autores Iannaccone et al. (2020) realizaram uma avaliação de sustentabilidade na implementação do GNL e do ODM como combustível para um navio de cruzeiro de grande porte. A análise abrangeu três indicadores: meio ambiente, economia e segurança. Foram propostos quatro esquemas com diferentes sistemas de combustível, resultando em um desempenho geral excelente das tecnologias baseadas em GNL em comparação com o ODM. No entanto, o indicador de segurança penaliza as soluções tecnológicas quando o GN é processado em alta pressão. O resultado do estudo apontou limitações relacionadas à segurança a bordo, ao abastecimento do combustível e à disposição do espaço para os tanques.

Os autores Xu e Yang (2020) avaliaram a viabilidade econômica e a emissão de CO<sub>2</sub> em navios porta-contêineres movidos a GNL na rota do Mar do Norte. Para isso, realizaram uma análise empírica comparando os lucros de transporte e as emissões de CO<sub>2</sub> entre três opções de rota de GNL na rota do Mar do Norte e de HFO na rota do Mar do Norte e pela rota do Canal de Suez. Os cálculos de consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub> foram baseados em dados amostrais. Os resultados mostraram que a opção GNL é a mais viável economicamente e que emite menos CO<sub>2</sub>, e a rota do Canal de Suez que utiliza o HFO apresentou-se menos viável economicamente. Concluíram que o uso de navios porta-contêineres movidos a GNL na Rota do Mar do Norte pode ser uma alternativa viável e sustentável para o transporte de carga entre a Ásia e a Europa.

Os autores Arefin et al. (2020) realizaram uma revisão técnica sobre o uso de GNL como combustível em motores diesel. Analisaram a literatura sobre as oportunidades, desafios e respostas relacionadas ao uso de GNL como combustível potencial. Os resultados indicaram que o uso de GNL pode melhorar significativamente a eficiência do sistema, reduzir as emissões de gases de efeito estufa e o transporte em longas distâncias devido a sua característica de liquefação onde a temperatura é mantida em -163°C. No entanto, existem desafios significativos a serem superados, como a infraestrutura de abastecimento limitada e a necessidade de modificações nos motores diesel existentes. Em conclusão, esta aplicação apresenta oportunidades significativas, mas é necessário superar desafios para tornar essa tecnologia uma opção viável e amplamente adotada.

O estudo de Aneziris, Koromila e Nivolianitou (2020) realiza uma revisão sistemática sobre a segurança do GNL, com o objetivo de oferecer uma visão geral das regulamentações, padrões e diretrizes para avaliar os riscos e perigos associados ao armazenamento e transferência de GNL em portos. O estudo abrange diferentes métodos de abastecimento, como por caminhão-tanque, navio-tanque e pontão de abastecimento, evidenciando que, embora o GNL seja um combustível mais limpo do que os combustíveis marítimos tradicionais, seu uso requer infraestrutura e equipamentos especializados. Os autores enfatizam a necessidade contínua de pesquisa e desenvolvimento para abordar preocupações de segurança e otimizar o uso de GNL como combustível marítimo.

A pesquisa feita por Lim e Lim (2020) apresenta uma análise sobre as oportunidades e desafios de investir em navios com GNL como combustível. A finalidade do estudo foi avaliar os benefícios econômicos e financeiros da adoção em navios de frotas de empresas de navegação. Assim, realizaram uma análise de dados financeiros e econômicos de empresas de transporte marítimo que adotaram navios movidos a GNL com aquelas que não adotaram. Os resultados indicaram que a adoção do GNL pode trazer benefícios significativos em termos de eficiência operacional, rentabilidade e desempenho de ações. No entanto, também há desafios a serem enfrentados, como a necessidade de investimentos em infraestrutura e tecnologia, bem como a conformidade com regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas.

A revisão bibliográfica realizada por Seung-Man Ha et al. (2020) apresenta que o uso do GNL como combustível de embarcações tem se mostrado uma alternativa viável e promissora para reduzir as emissões de gases poluentes no setor marítimo. O objetivo deste estudo foi analisar as principais características e desafios do uso do GNL como combustível de embarcações, bem como as regulamentações e normas de segurança aplicáveis. Os resultados mostram que há desafios regulamentares e de segurança que precisam ser superados para garantir a segurança das operações. Concluíram que o uso do GNL como combustível de embarcações é uma tendência crescente no setor marítimo, mas requer uma abordagem integrada e colaborativa entre os setores público e privado para garantir a segurança e a sustentabilidade das operações.

O estudo experimental realizado por Budiyanto et al. (2020) analisou o desempenho de um motor bicomcombustível em relação à variação da porcentagem de massa de GNL e diesel na mistura. A análise foi realizada em um motor de combustão interna

de quatro tempos, com uma potência nominal de 5,2 kW. Os resultados mostraram que o desempenho do motor é influenciado pela porcentagem de GNL na mistura, com um desempenho ótimo alcançado com uma mistura de substituição do óleo diesel, em 80% da massa. A análise experimental mostrou que o uso de uma mistura de GNL e diesel pode ser uma solução viável para reduzir as emissões de gases de efeito estufa em navios.

Segundo o estudo Wang, Ju e Fu (2021) foi realizada uma análise comparativa do custo do ciclo de vida de sistemas de abastecimento de gás de baixa pressão em navios movidos a GNL, levando em conta a gestão do gás vaporizado (BOG). Foram examinados nove casos com diferentes escalas de navios e configurações de sistemas, com ênfase nas variações de custo ao longo das viagens. Os resultados indicam que o custo do ciclo de vida é amplamente influenciado pela escala do navio, pelo preço do GNL e pelo padrão de operação. A reliquefação do BOG a bordo é uma opção viável para tempos de viagem curtos, enquanto para alto tempo de viagem é para motores auxiliares.

A revisão sistemática de Fan, Enshaei e Jayasinghe (2021) é sobre a segurança e a metodologia de análise de riscos para as operações simultâneas (SIMOPs) de abastecimento de GNL em navios. O objetivo foi revisar vários estudos e documentos aplicáveis para entender a segurança das operações de abastecimento de GNL, para que possa ajudar a manter um cronograma de navegação apertado e otimizar custos. A análise dos resultados identificou lacunas na pesquisa e destaca as áreas mais produtivas para futuras investigações. As conclusões são a priorização da cultura de segurança e a necessidade de estabelecer procedimentos operacionais seguros e eficazes para SIMOPs de abastecimento de GNL.

O artigo de Shao et al. (2022) apresenta uma avaliação preliminar dos riscos na implementação de um sistema de abastecimento GNL em um pequeno navio de pesca. Os tanques de GNL foram dimensionados a partir do consumo do motor instalado, depois aplicaram a abordagem de identificação de perigos durante a operação. Foram identificados 45 riscos, sendo 21 relacionados ao processo de abastecimento do GNL e 24 relacionados à operação de pesca, mas foram descartados 25 devido ao baixo impacto. O estudo ajudou a identificar e categorizar os principais riscos associados à implementação de um sistema de abastecimento de GNL em um navio de pesca de pequeno porte. O estudo contribuiu para o desenvolvimento de medidas mitigadoras de segurança para garantir a operação segura do navio.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são apresentados os fundamentos teóricos necessários para realizar a análise de estabilidade em grandes ângulos de inclinação, abrangendo os cálculos para os braços de emborcamento decorrentes do acúmulo de passageiros, influência do vento e guinada. Além disso, apresenta a curva de estabilidade estática corrigida com efeito de superfície livre. A análise da estabilidade intacta seguirá os critérios estabelecidos pela NORMAM 202/DPC (2023) para as áreas 1 e 2 de navegação, considerando as condições específicas de carregamento para uma embarcação de passageiros e carga.

Também é apresentado o procedimento de cálculo do consumo de combustível, aplicando-o tanto ao para o ODM quanto ao para o GNL, juntamente com o dimensionamento do volume necessário para o tanque de GNL. Adicionalmente, são apresentadas as equações para a avaliação da viabilidade econômica, proporcionando uma compreensão dos custos de combustível e receita da embarcação para ambos os combustíveis.

#### 3.1 Estabilidade intacta

A estabilidade intacta se refere à capacidade do navio de retornar à sua posição original após ser perturbado por uma força externa. Seu estudo é crucial para garantir a segurança do navio, dos passageiros e da tripulação, considerando diversas condições a qual o navio é submetido, como vento e a guinada. Os cálculos para analisar a estabilidade é determinada pelas características geométricas do navio, como seu peso leve, forma e centro de gravidade. Além de ser necessário também corrigir as curvas de estabilidade com o efeito de superfície livre dos tanques de líquido.

A estabilidade pode ser classificada como estável, neutra e instável. Os autores Barras e Derrett (2006) definem a estabilidade como estável quando o navio tende a retornar a posição inicial, o que requer uma altura metacêntrica (GM) positiva, visto na Figura 3.1 (a). A estabilidade neutra ocorre quando a embarcação permanece na mesma posição quando é inclinada após a atuação de uma força externa, mostrada na Figura 3.1 (b). Já a estabilidade instável ocorre quando, após a embarcação sofrer uma força externa, continua a se mover para longe da sua posição inicial, resultando em um GM negativo, como a Figura 3.1 (c).

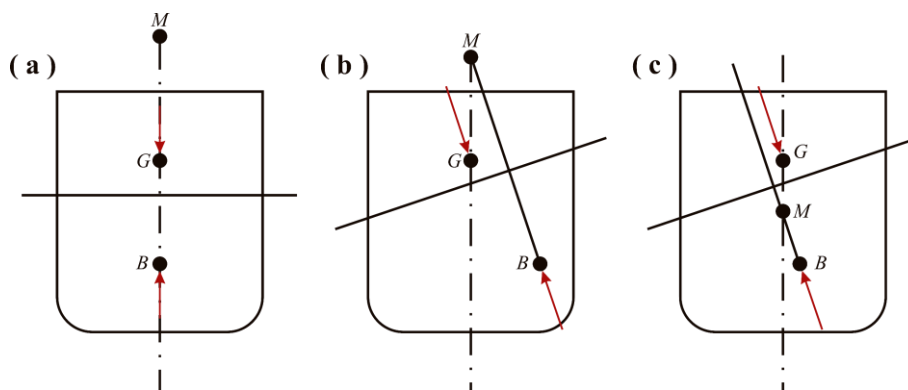


Figura 3.1. As condições de estabilidade intacta.  
Fonte: Barras e Derrett (2006).

### ❖ Estimativa de pesos e centros

O centro de gravidade é o ponto em que todo o peso do navio é considerado concentrado, e sua posição é importante para avaliar a estabilidade do navio em diferentes condições de operação. A estimativa do centro de gravidade envolve a determinação da posição do centro de gravidade longitudinal (LCG), vertical (VCG) e transversal (TCG) do navio, e podem ser dimensionados por meio da prova de porte bruto ou podem ser determinadas pela estrutura da embarcação. A posição do centro de gravidade também é usada para calcular o GM e outros parâmetros de estabilidade. Determina o LCG, VCG e o TCG de acordo com Biran e López-Pulido (2014) nas Eqs. (3.1) a (3.3), respectivamente.

$$LCG = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \times lcg_i)}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (3.1)$$

$$VCG = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \times vcg_i)}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (3.2)$$

$$TCG = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \times tcg_i)}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (3.3)$$

Onde,

$n$  = número de componentes que influencia no deslocamento total da embarcação;

$m_i$  = peso do componente;

$lcg_i$  = posição longitudinal do componente;

$vcg_i$  = posição vertical do componente;

$tcg_i$  = posição transversal do componente.

#### ❖ Cálculo do momento de superfície livre

O movimento de um líquido em tanques parcialmente cheios influencia o na estabilidade devido à alteração do centro de gravidade do líquido. Consequentemente, se faz necessário o ajuste da curva de estabilidade estática por meio do momento de superfície livre, a expressão é descrita na NORMAM 202/DPC (2023) e apresentado na Eq. (3.4). Vale ressaltar que somente tanques nos quais o momento de superfície livre é superior a 10% do peso leve da embarcação serão considerados nesse cálculo.

$$M_{SL} = v \times b \times y \times k \times \sqrt{\delta} \quad (3.4)$$

Onde,

$M_{SL}$  = momento de superfície livre;

$v$  = volume total do tanque;

$b$  = largura máxima do tanque;

$y$  = peso específico do líquido no tanque;

$\delta$  = coeficiente de bloco do tanque, dado como  $\delta = \frac{v}{b \times l \times h}$ ;

$l$  = comprimento máximo do tanque;

$h$  = altura máxima do tanque;

$k$  = coeficiente adimensional pode ser obtido pela Tabela 3.1, ou através das seguintes expressões:

- Se  $\cot \theta \geq \left(\frac{b}{h}\right)$ , o valor de  $k$  é obtido pela Eq. (3.5):

$$k = \left(\frac{\sin \theta}{12}\right) \times \left(1 + \frac{\tan^2 \theta}{2}\right) \times \left(\frac{b}{h}\right) \quad (3.5)$$

- Se  $\cot \theta \leq \left(\frac{b}{h}\right)$ , o valor de  $k$  é obtido pela Eq. (3.6):



$$k = \left(\frac{\cos \theta}{8}\right) \times \left[1 + \left(\frac{\tan \theta \times h}{b}\right)\right] - \left(\frac{\cos \theta \times h^2}{12 \times b^2}\right) \times \left[1 + \frac{\cot^2 \theta}{2}\right] \quad (3.6)$$

Onde,

$\theta$  = ângulo de inclinação.

Tabela 3.1. Valores de k

$\theta$ (°)	5	10	15	20	30	40	45	50	60	70	75	80	90
b/h	<b>k</b>												
20,00	0,11	0,12	0,12	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,01
10,00	0,07	0,11	0,12	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,01
5,00	0,04	0,07	0,10	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05	0,03
3,00	0,02	0,04	0,07	0,09	0,11	0,11	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,04
2,00	0,01	0,03	0,04	0,06	0,09	0,11	0,11	0,11	0,10	0,09	0,09	0,08	0,06
1,50	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,08
1,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13
0,75	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,05	0,07	0,08	0,12	0,15	0,16	0,16	0,17
0,50	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,04	0,05	0,09	0,16	0,18	0,21	0,25
0,30	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,05	0,11	0,19	0,27	0,42
0,20	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,07	0,13	0,27	0,63
0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,06	0,14	1,25

Fonte: NORMAM 202/DPC (2023).

### ❖ Cálculo do braço de endireitamento corrigido

A análise da estabilidade de embarcações em grandes ângulos de inclinação oferece uma representação mais realista das condições operacionais enfrentadas por essas embarcações em comparação com a análise para pequenos ângulos, que é aplicável quando o GM não se desloca visivelmente de sua posição inicial. A Eq. (3.7), proposta por Attwood (1922), mostra a correção para o braço de restauração (GZ) em diferentes ângulos de inclinação.

$$GZ = KN - KG \sin \theta \quad (3.7)$$

Onde,

KN = Curva cruzada de estabilidade;

$$KG = VCG.$$

Conforme mencionado por Lewis (1988), as curvas KN representam distância vertical entre o KG de uma embarcação e a linha vertical que passa pelo VCB quando a embarcação está inclinada, como observado na Figura 3.2. Assim, as curvas cruzadas são um conjunto de curvas que mostram a alavanca de adrizamento em relação a um centro de gravidade assumido para qualquer ângulo de inclinação em uma determinada condição de deslocamento. Esses valores são essenciais para realizar correções da curva GZ.

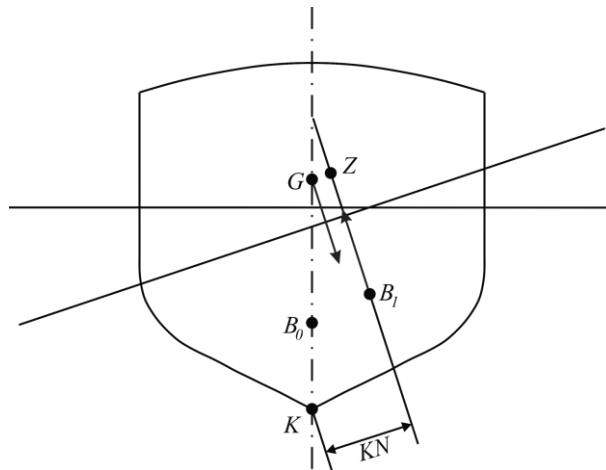


Figura 3.2. Braço de restauração.  
Fonte: Biran e López-Pulido (2014).

Em resumo, a curva GZ deve ser corrigida em relação ao  $M_{SL}$ , visto que como a estabilidade intacta é avaliada em diferentes carregamentos, os tanques de líquidos parcialmente cheios influenciam na estabilidade devido a mudança do VCB. Então, a correção para a curva GZ da Eq. (3.7), resulta na Eq. (3.8).

$$GZ = KN - \left( KG \sin \theta + \frac{M_{sl}}{\Delta} \right) \quad (3.8)$$

#### ❖ Braço de emborcamento devido ao agrupamento de passageiros

Os braços de emborcamento são fundamentais para avaliar a estabilidade de um navio em diversas situações, incluindo o impacto do acúmulo de passageiros em um dos bordos. Assim, quando uma grande quantidade de passageiros se concentra em um lado da embarcação, há uma redistribuição do peso, alterando os braços de restauração. Este fenômeno pode afetar significativamente a estabilidade transversal do navio, uma vez que os braços de emborcamento estarão sujeitos a mudanças, impactando na estabilidade

geral. A curva dos braços de emborcamento devido a passageiros é definido pela NORMAM 202/DPC (2023) pela Eq. (3.9).

$$B_p = \frac{M_p}{\Delta} \quad (3.9)$$

Onde,

$B_p$  = braço de emborcamento devido ao agrupamento de passageiros em um bordo;

$M_p$  = momento emborcador devido ao agrupamento de passageiros, obtido pela Eq. (3.10);

$\Delta$  = deslocamento da embarcação.

$$M_p = P \times N \times Y_c \times \cos \theta \quad (3.10)$$

Onde,

$P$  = peso de cada passageiro, pela NORMAM 202/DPC (2023) é considerado 0,075 t;

$N$  = número de passageiros no convés;

$Y_c$  = distância do centroide da área ocupada pelo acúmulo de passageiros, em relação a linha de centro.

#### ❖ Braço de emborcamento devido ao vento

Os braços de emborcamento também desempenham um papel crucial na estabilidade do navio diante de forças externas, como o vento. Quando uma embarcação é exposta a ventos fortes, ocorre uma inclinação que é determinada pelos braços de restauração. A influência do vento pode deslocar o centro de gravidade do navio em relação ao centro de flutuação, modificando os braços de emborcamento. De acordo com a NORMAN 202 (2023), estes braços podem ser calculados de acordo com a Eq. (3.11).

$$B_v = \frac{M_v}{\Delta} \quad (3.11)$$

Onde,

$B_v$  = braço de emborcamento devido a ação do vento;

$M_v$  = momento emborcador devido a ação do vento, calculado pela Eq. (3.12).

$$M_v = 5,48 \times 10^{(-6)} \times A \times h \times V^2 \times (0,25 + 0,75 \cos^3 \theta) \quad (3.12)$$

Onde,

$A$  = área lateral exposta ao vento;

$h$  = distância vertical entre o centro da área lateral exposta e um ponto correspondente a metade do calado médio na condição considerada;

$V$  = velocidade do vento, pela norma considera-se 80 km/h;

### ❖ Braço de emborcamento devido a guinada

Além disso, os braços de emborcamento são essenciais ao considerar a guinada de uma embarcação. Quando a força de guinada atua sobre o navio, os braços de restauração determinam a capacidade da embarcação de se estabilizar e a NORMAM 202/DPC (2023) define o cálculo pela Eq. (3.13).

$$B_g = \frac{M_g}{\Delta} \quad (3.13)$$

Onde,

$B_g$  = Braço de emborcamento devido a guinada;

$M_g$  = momento emborcador devido a guinada, obtido pela Eq. (3.14).

$$M_g = \frac{0,02 \times V_o^2 \times \Delta \times \left(KG - \frac{H}{2}\right)}{L} \quad (3.14)$$

Onde,

$V_o$  = velocidade de serviço da embarcação;

$KG$  = altura do centro de gravidade acima da quilha;

$H$  = calado médio;

$L$  = comprimento de linha d'água;

## 3.2 Critérios de estabilidade e condições de carregamento da NORMAM 202

Os critérios de estabilidade são padrões e limites estabelecidos para garantir a segurança da embarcação para diferentes condições de operação. Os critérios exigidos

pela NORMAM 202/DPC (2023) variam de acordo com a área de navegação em que a embarcação atua. Na Área 1, onde normalmente não são verificadas ondas com alturas significativas que possam apresentar dificuldades ao tráfego da embarcação, e na Área 2, onde a presença de ondas pode dificultar o tráfego da embarcação. Assim, a estabilidade intacta é analisada de acordo com os seguintes critérios:

- O ângulo de equilíbrio estático da embarcação ( $\theta_1$ ), a partir da curva do braço de emborcamento, deve ser menor ou igual ao ângulo de imersão do convés ( $\theta_c$ ), ou  $15^\circ$  para a Área 1 e  $12^\circ$  para a Área 2, o que for menor;
- A área compreendida entre a curva de estabilidade estática e as curvas dos braços de emborcamento, até o ângulo de alagamento ( $\theta_f$ ) ou  $40^\circ$ , o que for menor (representada como área B na Figura 3.3), deverá ser maior ou igual a uma vez a área sob a curva dos braços de emborcamento antes da interseção com a curva de estabilidade estática para a Área 1 e 1,2 vezes a área correspondente para a Área 2 (representada como área A na Figura 3.3);
- A altura metacêntrica inicial ( $GM_o$ ) deverá ser maior ou igual a 0,35 m;
- $\theta_f$  maior ou igual a  $25^\circ$  para Área 1 e  $30^\circ$  para Área 2;
- Braço de endireitamento máximo maior ou igual a 0,10 m para Área 1 e 0,15m para Área 2.

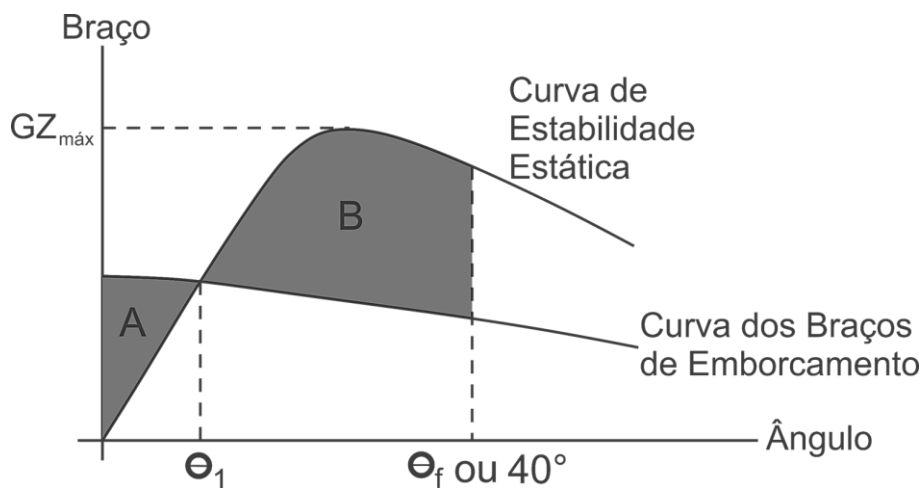


Figura 3.3. Critérios de Estabilidade.  
Fonte: NORMAM 202/DPC (2023).

O ângulo de imersão do convés ( $\theta_c$ ) é definido pela norma, e expressado na Eq. (3.15) como:

$$\theta_c = \tan^{-1} \left( \frac{P - HM}{\frac{B}{2}} \right) \quad (3.15)$$

Onde,

$P$  = ponta (m);

$HM$  = calado da condição (m);

$B$  = boca moldada (m).

O ângulo de alagamento ( $\theta_f$ ) é definido pela norma, e expressado na Eq. (3.16), como:

$$\theta_f = \tan^{-1} \left( \frac{P_z - HM}{P_y} \right) \quad (3.16)$$

Onde,

$P_z$  = posição vertical do ponto de alagamento em relação a linha de base (m);

$P_y$  = posição transversal do ponto de alagamento em relação a linha de centro (m).

#### ❖ Condições de carregamento

Os critérios de estabilidade são avaliados em cada condição de carregamento, considerando os impactos que cada uma dessas condições pode ter na estabilidade da embarcação. A NORMAM 202/DPC (2023) estabelece algumas condições fundamentais para embarcações de passageiros e carga, as quais são as seguintes:

1. Embarcação na condição de partida do porto totalmente carregada com gêneros, óleo, carga e passageiros e suas bagagens;
2. Embarcação na condição de chegada ao porto totalmente carregada com carga e passageiros com suas bagagens, mas com apenas 10% dos gêneros e combustível;
3. Embarcação sem carga, mas com abastecimento total de gêneros e óleo, e com número máximo de passageiros e suas bagagens;
4. Embarcação na mesma condição que a descrita no item 3, acima, mas com apenas 10% de abastecimento de gêneros e combustível;
5. Embarcação na condição de carga total de partida, totalmente abastecida de gêneros e óleo, porém sem passageiros;

6. Embarcação na condição de carga total na chegada ao porto, com 10% de gêneros e combustível, sem passageiros.

### 3.3 Consumo de combustível e dimensionamento do tanque

O cálculo de consumo de combustível é uma estimativa da quantidade de combustível que a embarcação irá consumir durante um determinado período ou distância percorrida (autonomia). A Eq. (3.17) apresenta a expressão que determina o consumo de combustível em relação à potência do motor. Esse cálculo é crucial para a análise comparativa de custos entre diferentes tipos de combustíveis, pois permite estimar o custo total de combustível para cada cenário.

$$FC = \frac{SFC \times NCR \times 24}{10^6} \quad (3.17)$$

Onde,

$FC$  = consumo de combustível (t/dia);

$SFC$  = consumo específico do motor (g/kWh);

$NCR$  = potência do motor (kW).

Os autores Shao et al. (2022) dimensionam o volume do tanque pela Eq. (3.18) em relação ao tempo de viagem, sendo que para o GNL o  $tx$  é uma taxa de expansão de 10% do volume.

$$Vol = \left( \frac{FC \times T_v}{\rho} \right) \times tx \quad (3.18)$$

Onde,

$Vol$  = volume do tanque (m<sup>3</sup>);

$T_v$  = tempo de viagem (dia);

$\rho$  = densidade do combustível (t/m<sup>3</sup>).

### 3.4 Código IGF

O código IGF é uma resolução da IMO que determina requisitos específicos para a construção e transporte de combustíveis com baixo ponto de fulgor, a fim de diminuir a probabilidade de riscos durante a operação. Na parte A-1 são detalhados os requisitos

para os navios que usam o GN como combustível, onde define que os tanques de combustíveis devem ser protegidos de danos externos por colisão ou encalhe.

Para uma embarcação de passageiros o código IGF determina que o tanque deve estar localizado da seguinte forma:

- a) A partir de  $B/10$  do costado, mas em nenhum caso menor que 0,8 m.
- b) A posição vertical deve ser posicionada a partir de  $B/15$  ou 2 m, o que for menor, do ponto mais baixo em relação a linha de centro.

### 3.5 Viabilidade econômica

A avaliação da viabilidade econômica de um projeto concentra-se em sua habilidade para gerar lucro ou retorno financeiro suficiente, justificando tanto o investimento inicial quanto os custos operacionais. Nesse contexto, os autores Xu e Yang (2020) determinam o lucro médio por viagem de uma embarcação pela diferença entre a receita e o custo de combustível. Assim, o custo de combustível por viagem é obtido pela Eq. (3.19).

$$CFV = PF \times T_v \times FC \quad (3.19)$$

Onde,

$CFV$  = consumo de combustível por viagem (R\$/viagem);

$PF$  = preço do combustível (R\$/t);

A receita da embarcação está relacionada com o valor do frete das cargas e o valor da passagem dos passageiros, assim a receita é expressa na Eq. (3.20).

$$RV = VF \times Z_c + VP \times Z_p \quad (3.20)$$

Onde,

$RV$  = receita por viagem (R\$);

$VF$  = valor do frete (R\$);

$Z_c$  = capacidade de carga (t);

$VP$  = valor da passagem por passageiro (R\$);

$Z_p$  = capacidade de passageiros.



## 4 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo, é apresentada a embarcação utilizada como modelo para a transição de combustível, passando do ODM para o GNL. É importante ressaltar que a obtenção das informações foi fornecida pelo chefe de máquinas da embarcação, assim possibilitou a análise da viabilidade econômica associada à conversão para o GNL como fonte de energia. Desta forma, a mudança de combustível se estende tanto à conversão de embarcações existentes quanto à construção de novas. Além disso, são abordados os aspectos da rota percorrida pela embarcação e as características dos pontos de parada.

### 4.1 Características da embarcação

A embarcação escolhida para este estudo de caso é uma embarcação do tipo *ferryboat* de passageiros e carga que opera no estado do Amazonas, na rota Manaus – Tabatinga, apresentada na Figura 4.1. Esse *ferryboat* foi lançado no ano de 2013, e construído em aço naval com a capacidade de transportar 354 pessoas em rede e em camarote, sendo que 160 são passageiros transportados no convés principal, 125 no convés do passadiço, 59 no convés superior e 10 são tripulantes, a disposição dos passageiros e tripulantes nos conveses podem ser vistos no Anexo A.



Figura 4.1. *Ferryboat*.  
Fonte: Autoria Própria (2023).

A embarcação tem a capacidade de transportar 522,78 t de carga, distribuídas em seis porões, em uma câmara fria e na proa pode acomodar 15 veículos ou 30 t de carga seca, como visto na Figura 4.2.

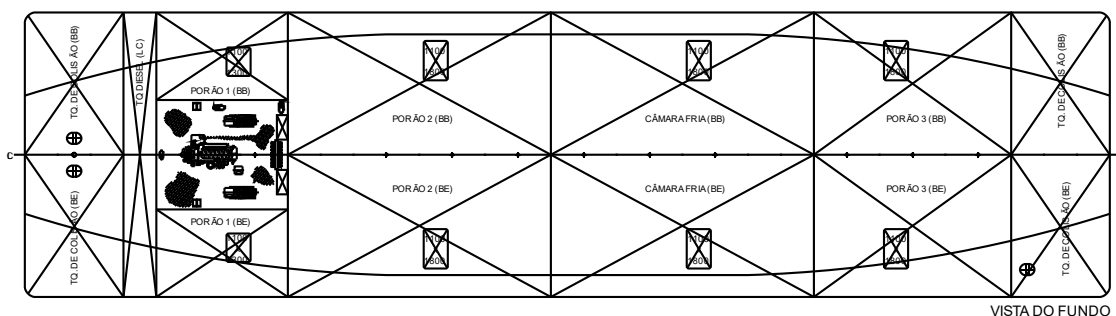


Figura 4.2. Vista do fundo do *ferryboat*.

As características principais do *ferryboat* estão detalhadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Características Principais da Embarcação

Comprimento total (L)	49,50 m
Comprimento entre perpendiculares (Lpp)	46,40 m
Boca moldada (B)	13,00 m
Pontal moldado (P)	2,40 m
Calado de projeto (H)	2,04 m
Deslocamento leve ( $\Delta_{leve}$ )	238,90 t
Calado leve ( $H_{leve}$ )	0,607 m
Deslocamento carregado ( $\Delta_{carregado}$ )	827,31 t
Calado carregado ( $H_{carregado}$ )	2,01 m

A velocidade de operação a montante do rio é de 9 nós, enquanto a jusante do rio é de 14 nós. Na embarcação, encontra-se instalado um motor principal fabricado pela Yanmar, modelo 6AYW-WET, com potência de 610 kW e 1900 rpm. Os modos de operação variam ao longo da viagem, onde a montante o motor mantém uma rotação de 1600 rpm, enquanto a jusante rotação é reduzida para 1300 rpm. Nas Figura 4.3 e Figura 4.4 são apresentadas as curvas de desempenho do motor que foram utilizadas para determinar a potência e o consumo de combustível conforme o modo de operação.

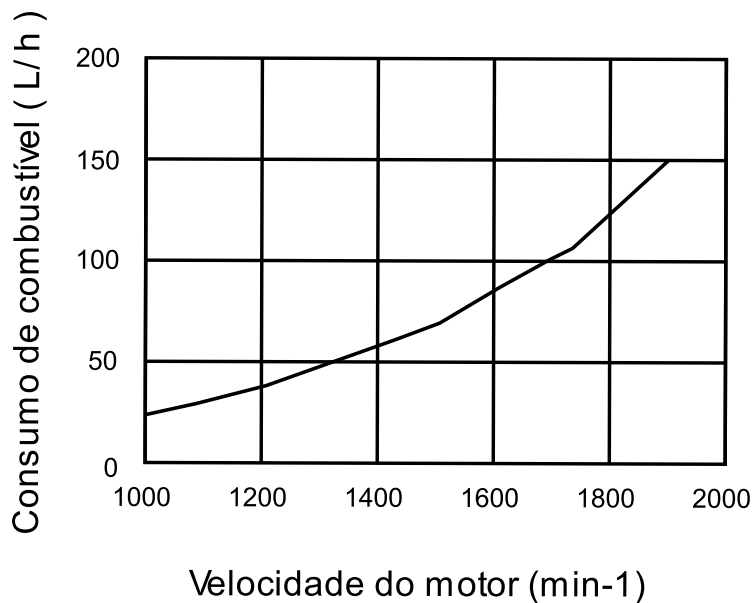


Figura 4.3. Curva de consumo de combustível do motor Yanmar 6AYW-WET  
 Fonte: Yanmar (2023).

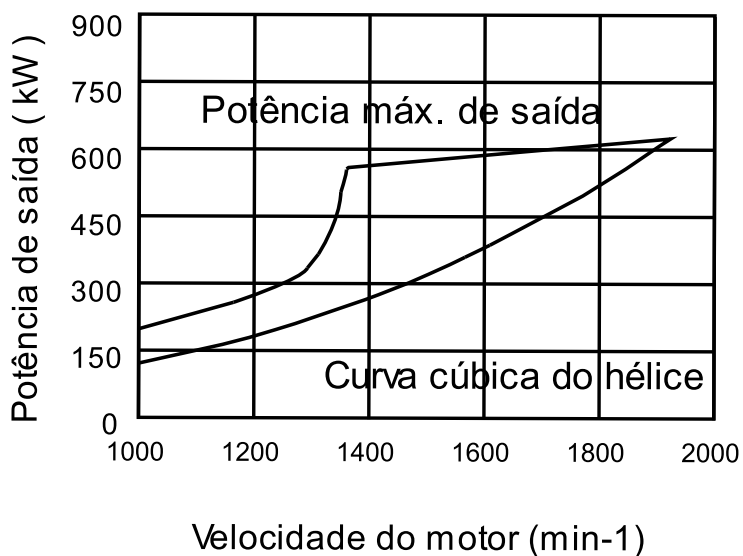


Figura 4.4. Curva de potência de saída do motor Yanmar 6AYW-WET.  
 Fonte: Yanmar (2023).

Os valores cobrados durante a viagem variam de acordo com o trajeto escolhido pelo passageiro e a opção de acomodação em rede ou camarote. Assim, o preço médio da passagem é de aproximadamente R\$ 338,13 /passageiro, sendo importante observar que a alimentação durante a viagem constitui um custo adicional ao valor da passagem. No que diz respeito ao transporte de carga, o valor do frete é determinado pelo tipo de carga, seu peso e o trajeto percorrido. Nesse contexto, o preço médio do frete é de R\$ 400,00 /t.

## 4.2 Estudo da rota

O trecho percorrido pelo *ferryboat* situa-se no Rio Solimões, localizado no estado do Amazonas, sendo considerado o rio com o maior volume de água com uma extensão de 1620 km. A navegação nesse rio desempenha um papel significativo tanto para a economia quanto para a qualidade de vida das pessoas, que residem nas cidades às suas margens. De acordo com o último relatório da ANTAQ (2017), foram transportados no ano de 2017 o total de 120528 passageiros entre as Manaus e Tefé, além de 87840 t de carga anuais entre as cidades de Manaus e Tabatinga.

Nesse contexto, o *ferryboat*, que foi utilizado como caso de estudo, percorre toda a extensão do Rio Solimões com pontos de parada nas cidades de Manaus, Fonte Boa, Jutai, Tonantins, Santo Antônio do Içá, Amaturá, São Paulo de Olivença, Benjamin Constant e Tabatinga, conforme ilustrado na Figura 4.5. O *ferryboat* realiza a viagem em um período total de 14 dias, incluindo o tempo navegando e o tempo das paradas nos portos. Nesse itinerário, possui a distância total de 1597 km.



Figura 4.5. Itinerário do *ferryboat*  
Fonte: Adaptado do GoogleEarth (2023).

O maior trecho entre paradas percorrido pela embarcação ocorre entre Manaus e Fonte Boa, totalizando 888 km, demandando dois dias de navegação. Na Tabela 4.2, são apresentadas as características dos demais pontos de parada ao subir o rio, levando em consideração tanto o tempo de navegação quanto a permanência da embarcação atracada no porto.

Tabela 4.2. Linha de atuação subindo o rio.

<b>Dia</b>	<b>Cidade de partida</b>	<b>Cidade de chegada</b>	<b>Tempo de percurso (h)</b>	<b>Tempo de parada (h)</b>	<b>Distância (km)</b>
1	Manaus	Fonte Boa	66,00	2,00	888,00
4	Fonte Boa	Jutaí	9,00	2,00	131,00
4	Jutaí	Tonantins	12,00	2,00	165,00
5	Tonantins	Santo Antônio do Içá	4,00	2,00	35,20
5	Santo Antônio do Içá	Amaturá	5,00	2,00	58,23
5	Amaturá	São Paulo de Olivença	7,00	3,00	89,50
6	São Paulo de Olivença	Benjamin Constant	21,00	7,00	210,00
7	Benjamin Constant	Tabatinga	2,00		21,10

A embarcação permanece na cidade de Tabatinga por 3 dias antes de retornar a Manaus. Na Tabela 4.3, são apresentadas informações sobre a condição de retorno, observando-se uma redução no tempo.

Tabela 4.3. Linha de atuação descendo o rio.

<b>Dia</b>	<b>Cidade de partida</b>	<b>Cidade de chegada</b>	<b>Tempo de percurso (h)</b>	<b>Tempo de parada (h)</b>	<b>Distância (km)</b>
11	Tabatinga	Benjamin Constant	1,00	3,00	21,10
11	Benjamin Constant	São Paulo de Olivença	9,50	0,5	210,00
12	São Paulo de Olivença	Amaturá	4,00	1,00	89,50
12	Amaturá	Santo Antônio do Içá	2,00	1,00	58,23
12	Santo Antônio do Içá	Tonantins	1,00	1,00	35,20
12	Tonantins	Jutaí	7,00	1,00	165,00
12	Jutaí	Fonte Boa	5,00	1,00	131,00
13	Fonte Boa	Manaus	31,00		888,00

## 5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Com base nas informações apresentadas anteriormente, este capítulo se dedica à análise dos resultados após a transição de combustível no *ferryboat*. Assim, serão apresentados o dimensionamento dos tanques de armazenamento de GNL e a disposição destes, considerando o impacto no espaço de carga, que será reduzido devido à instalação dos tanques de armazenamento.

Além disso, serão avaliados os parâmetros de estabilidade intacta conforme estabelecidos na NORMAM 202/DPC (2023), em virtude do novo arranjo dos tanques e porões de carga. Este procedimento é essencial para garantir a segurança na navegação após as modificações propostas. Posteriormente, será apresentada uma análise da viabilidade econômica, abrangendo os custos de combustível associados à adoção do GNL para uso na propulsão principal.

### 5.1 Dimensionamento do tanque de GNL

Os tanques de armazenamento de GNL foram dimensionados considerando a proporção das misturas de hidrocarbonetos de um motor de combustão interna convertido para operar como um motor bicombustível. Logo, a partir do estudo realizado por Caligiuri e Renzi (2017), recomenda-se para que o motor de combustão interna seja capaz de operar na forma de bicombustível, é necessário ter uma mistura de 80% de gás e 20% de óleo diesel.

Então, a massa necessária de para os diferentes modos de operação da embarcação foram determinados a partir do consumo de combustível do motor Yanmar. Na Tabela 5.1, são apresentados os modos de operação informados pelo chefe de máquinas na visita feita a bordo do *ferryboat*. Vale destacar que a rotação de 1900 rpm se refere à rotação nominal do motor, a de 1600 rpm corresponde à rotação durante a navegação ao subir o rio, e 1300 rpm na viagem de regresso.

Tabela 5.1. Modos de operação do *ferryboat*.

Modo de navegação	RPM	Potência (kW)
Nominal do Motor	1900	610
Montante	1600	586
Jusante	1300	345

A partir das curvas de desempenho do motor Yanmar apresentadas no item 4.1 do capítulo 4, foram determinados os consumos específicos de diesel para diferentes rotações do motor. Logo, utilizando a Eq. (3.17) foi calculado o consumo total. Sabendo que o tempo total de viagem do *ferryboat*, partindo de Manaus e chegando a Tabatinga, é de 126 h, e o tempo de regresso é de 66,5 h, aplicou-se a Eq. (3.18) para determinar o volume do tanque de óleo diesel. Isso permitiu obter o valor de sua massa com a densidade de 0,85 t/m<sup>3</sup>, assim na Tabela 5.2 são apresentadas as massas para cada modo de navegação.

Tabela 5.2. Massa do óleo diesel.

<b>Modo de navegação</b>	<b>RPM</b>	<b>Massa (t)</b>
Nominal do Motor	1900	24,31
Montante	1600	9,15
Jusante	1300	2,69

Com base nas massas do óleo diesel calculadas, foi estabelecida a proporção de óleo diesel e GN necessária para a conversão do motor atual, tornando-o capaz de operar na forma de bicomustível, com a densidade do GN em  $7,6 \times 10^{-4}$  t/m<sup>3</sup>. Em seguida, foi admitida a redução do volume do GN na forma liquefeita do gás no fator de 600. Assim, na Tabela 5.3, são apresentados os volumes necessários para o óleo diesel, o GN e para o GNL, nos diferentes modos de operação durante a viagem.

Tabela 5.3. Volumes necessários para os diferentes combustíveis.

<b>Modo de navegação</b>	<b>RPM</b>	<b>Volume para o diesel (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume para o GN (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume para o GNL (m<sup>3</sup>)</b>
Nominal do Motor	1900	5,72	25586,29	42,64
Montante	1600	2,15	9635,21	16,06
Jusante	1300	0,63	2832,31	4,72

Os maiores volumes são necessários para o modo de navegação quando o motor opera nas condições máximas de rotação e potência. No entanto, nas condições reais de operação, o volume para subir o rio tem um consumo de combustível maior, enquanto ao

descer o rio é utilizado menos combustível. Essa diferença nos padrões de consumo destaca a influência significativa das condições de navegação na eficiência energética da embarcação.

## 5.2 Disposição do tanque de GNL

A realização da viagem exclusivamente com GNL apresenta diversos desafios, tais como a distribuição de pontos de abastecimento do GNL pelo estado do Amazonas e a falta de espaço disponível na embarcação. Em vista disso, existe o desafio dispor os tanques. Diante dessa limitação, foram considerados apenas as rotações de 1600 rpm e 1300 rpm para fazer a disposição dos tanques.

Com base no arranjo geral e na tabela de capacidades do *ferryboat* apresentados nos Anexo A e B, respectivamente, identificou-se que o espaço mais apropriado para posicionar o tanque é no segundo porão de carga, visto que está localizado próximo a praça de máquinas.

Diante disso, realizou uma avaliação de possíveis arranjos para os tanques e optou-se por dividir o volume do tanque em dois, visto que se instalasse apenas um tanque de GNL seria necessário um espaço com o comprimento de 15,33 m e o segundo porão tem 12 m de comprimento. Adicionalmente, foi considerando a estrutura do *ferryboat* e o código IGF para determinar a altura do tanque, resultando em um espaço disponível de apenas 1,3 m para posicionar o tanque no interior do casco.

Com os volumes calculados no item 5.1, são necessário 20,78 m<sup>3</sup> de GNL para a viagem completa da embarcação. No entanto, em vista da carência de abastecimento de gás natural no interior do estado foi considerado o cenário que a embarcação seria abastecida em Manaus para realizar a viagem a montante do rio com 16,06 m<sup>3</sup> de GNL. Então, para a avaliação da viabilidade da proposta foram consideradas as seguintes opções:

- a) Viagem completa de Manaus a Tabatinga exclusivamente com GNL como combustível principal;
- b) Viagem de Manaus a Tabatinga com GNL, mas utilizando o óleo diesel na viagem a jusante.



Em vista dessas hipóteses, na Tabela 5.4, são apresentadas as dimensões necessárias para os tanques de GNL para ambos os cenários. O dimensionamento dos tanques considerou a expansão do gás de 10% e a permeabilidade do tanque de 98%.

Tabela 5.4. Dimensões principais dos tanques de GNL

	Opção A	Opção B
Comprimento	7,92 m	5,92 m
Largura	1,3 m	1,3 m
Volume	11,66 m <sup>3</sup>	9,01 m <sup>3</sup>

Para a opção A, há uma perda de 15 t de carga, devido as suas dimensões comprometer o espaço do segundo porão, a disposição pode ser vista na Figura 5.1.

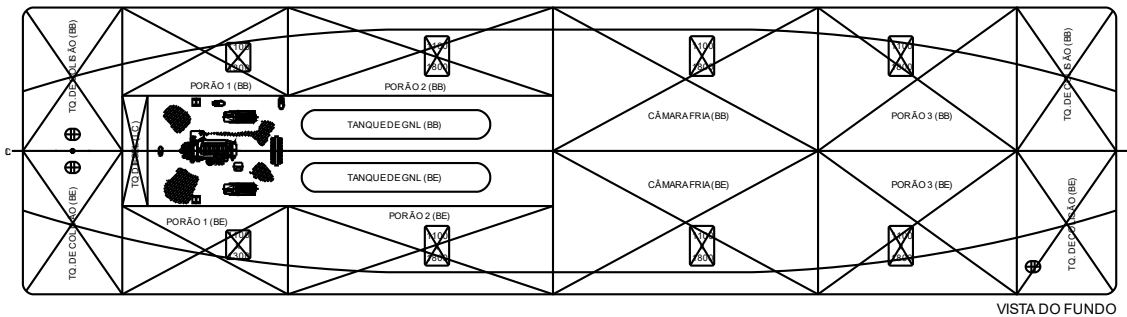


Figura 5.1. Disposição dos tanques de GNL para a opção A.

Enquanto na opção B, não há perda de capacidade de carga devido as dimensões menores e a redução do tanque do óleo diesel, a disposição pode ser vista na Figura 5.2.

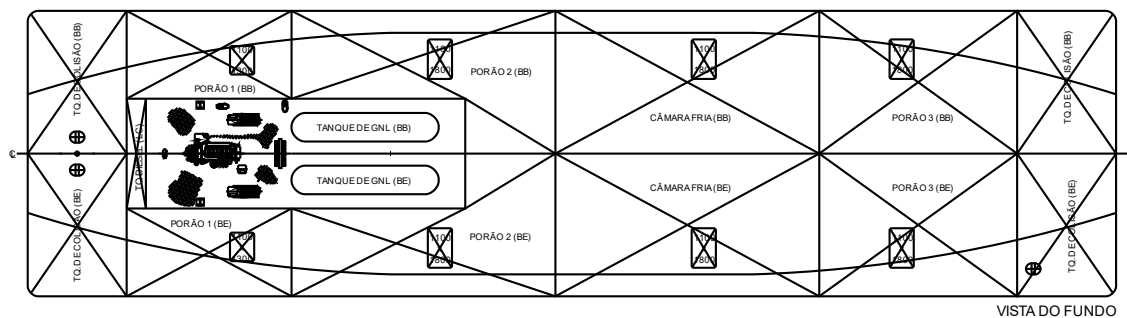


Figura 5.2. Disposição dos tanques de GNL para a opção B.

### 5.3 Avaliação dos critérios de estabilidade intacta

O estudo de estabilidade intacta teve início com a modelagem do casco a partir do plano de linhas, visando determinar as curvas hidrostáticas e cruzadas. Adicionalmente, foi necessário calcular o novo peso leve da embarcação e o seu centro de gravidade

utilizando as Eqs. (3.1) a (3.3), uma vez que foram adicionadas estruturas para acomodar os tanques.

O peso atribuído aos tanques criogênicos foi baseado no catálogo da empresa chinesa CSSC, onde o peso de um tanque de 23 m<sup>3</sup> é de 9 t. Após esse processo, foi elaborada a nova tabela de capacidades do *ferryboat*, resultando em um deslocamento total de 820,57 t. Na Tabela 5.5 são apresentados os pesos dos espaços de carga e o novo peso leve da embarcação. Por fim, a entrada da praça de máquinas foi considerada como um ponto de alagamento.

Tabela 5.5. Capacidades da embarcação funcionando com GNL.

<b>Componente</b>	<b>Peso (t)</b>	<b>LCG (m)</b>	<b>VCG (m)</b>	<b>TCG (m)</b>
Embarcação leve	242,900	22,207	4,705	0,000
Tanque de diesel (LC)	4,520	2,969	1,918	0,000
Tanque de GNL (BB/BE)	7,336	13,095	1,65	0,000
Porão de carga 1 (32,78 t) + 4,45 t de Bagagem (BB/BE)	35,000	6,000	1,653	0,000
Porão de carga 2 (BB/BE)	180,000	16,000	1,329	0,000
Porão de carga 3 (BB/BE)	100,000	37,861	1,601	0,000
Câmara fria (BB/BE)	180,000	27,705	1,320	0,000
Carga no convés (MN)	0,000	16,780	3,650	0,000
Carga no convés (Proa - Carga seca ou 15 veículos)	30,000	14,297	3,830	0,000

Desenvolveu-se um código em MATLAB para calcular a estabilidade intacta, proporcionando uma alternativa independente de softwares comerciais como Maxsurf, Hecsalv, DelftShip, entre outros, o que permitiu maior autonomia e liberdade na análise. Assim, para a avaliação dos critérios de estabilidade intacta foi considerado os requisitos mínimos para a primeira área de navegação, visto que a rota que o *ferryboat* faz, não apresenta ondas que dificultam o tráfego da embarcação. A estabilidade intacta foi avaliada para ambas as opções de implementação do GNL, e os respectivos resultados serão apresentados.

A fim de verificar os resultados obtidos pelo código, foi realizada a análise da estabilidade em um software comercial para verificar divergências. Na sequência, são apresentados os resultados da curva de estabilidade estática e a avaliação dos critérios de

estabilidade para área 1 de navegação da NORMAM 202/DPC (2023). Importante ressaltar que a análise foi realizada para cada condição de carregamento que foi descrito no item 3.2, do capítulo 3 deste trabalho.

A seguir, nas Figuras 5.3 a 5.8 são apresentadas as curvas de estabilidade intacta para a opção A e nas Tabelas 5.6 a 5.11 são apresentados os resultados para a avaliação dos critérios também para a opção A.

Em vista da verificação dos resultados calculados e os resultados obtidos pelo software comercial, as alturas metacêntricas calculadas foram verificadas com os dados obtidos com erros menores que 5%, enquanto os máximos braços de endireitamento comparados com o comercial foram menores que 12,29%.

Os erros dos ângulos de equilíbrio estático devido a passageiros foram menores que 1,53%, os erros dos cálculos das áreas da curva de estabilidade estática foram menores que 7,3% para a área A e 15,41% para a área B.

Os erros dos ângulos de equilíbrio estático devido ao vento foram menores que 1,47%, os erros dos cálculos das áreas da curva de estabilidade estática foram expressivos devido a dimensão dos números e resultou em erros menores que 41,01% para a área A e 20,09% para a área B.

Por fim, os erros dos ângulos de equilíbrio estático devido a guinada foram menores que 22,385%, o resultado foi expressivo também devido a dimensão do resultado. Os erros dos cálculos das áreas da curva de estabilidade estática foram menores que 1,0% para a área A e 19,663% para a área B.

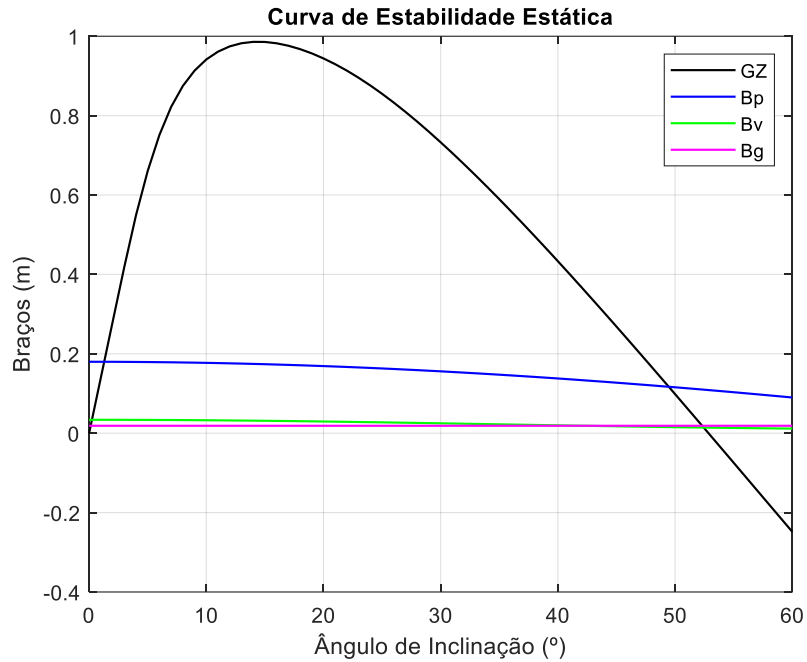


Figura 5.3. Curva de estabilidade estática da condição 1, na opção A.

Tabela 5.6. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 1, na opção A.

Item	Critério	Comercial	Calculado	Erro (%)	Requisito
$\theta_c$			3,411 °		
$\theta_f$	$\geq 25^\circ$		35,781 °		Aprovado
$GM_o$	$\geq 0,35$ m	8,264 m	7,851 m	4,999%	Aprovado
$GZ_{m\acute{a}x}$	$\geq 0,1$ m	1,124 m	0,986 m	12,294%	Aprovado
$\theta_p$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	1,269 °	1,288 °	1,480%	Aprovado
$A_A$		0,002 m.rad	0,002 m.rad	1,096%	
$A_B$		0,332 m.rad	0,383 m.rad	15,410%	
$A_B > A_A$					Aprovado
$\theta_v$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,239 °	0,242 °	1,098%	Aprovado
$A_A$		0,000 m.rad	0,000 m.rad	1,000%	
$A_B$		0,395 m.rad	0,468 m.rad	18,486%	
$A_B > A_A$					Aprovado
$\theta_g$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,111 °	0,134 °	20,407%	Aprovado
$A_A$		0,000 m.rad	0,000 m.rad	1,000%	
$A_B$		0,402 m.rad	0,475 m.rad	18,084%	
$A_B > A_A$					Aprovado

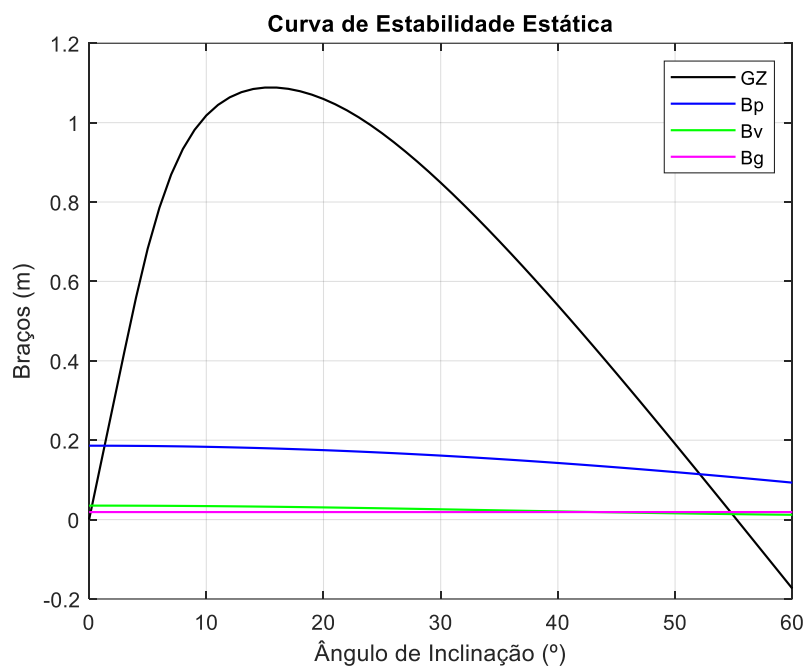


Figura 5.4. Curva de estabilidade estática da condição 2, na opção A.

Tabela 5.7. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 2, na opção A.

Item	Critério	Comercial	Calculado	Erro (%)	Requisito
$\theta_c$			3,824 °		
$\theta_f$	$\geq 25^\circ$		36,491 °		Aprovado
$GM_o$	$\geq 0,35$ m	8,357 m	7,941 m	4,974%	Aprovado
$GZ_{m\acute{a}x}$	$\geq 0,1$ m	1,236 m	1,088 m	11,947%	Aprovado
$\theta_p$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	1,303 °	1,323 °	1,536%	Aprovado
$A_A$		0,002 m.rad	0,002 m.rad	7,300%	
$A_B$		0,389 m.rad	0,441 m.rad	13,240%	
$A_B > A_A$					Aprovado
$\theta_v$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,247 °	0,249 °	0,834%	Aprovado
$A_A$		0,000 m.rad	0,000 m.rad	1,000%	
$A_B$		0,458 m.rad	0,530 m.rad	15,652%	
$A_B > A_A$					Aprovado
$\theta_g$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,111 °	0,134 °	20,690%	Aprovado
$A_A$		0,000 m.rad	0,000 m.rad	1,000%	
$A_B$		0,466 m.rad	0,537 m.rad	15,239%	
$A_B > A_A$					Aprovado

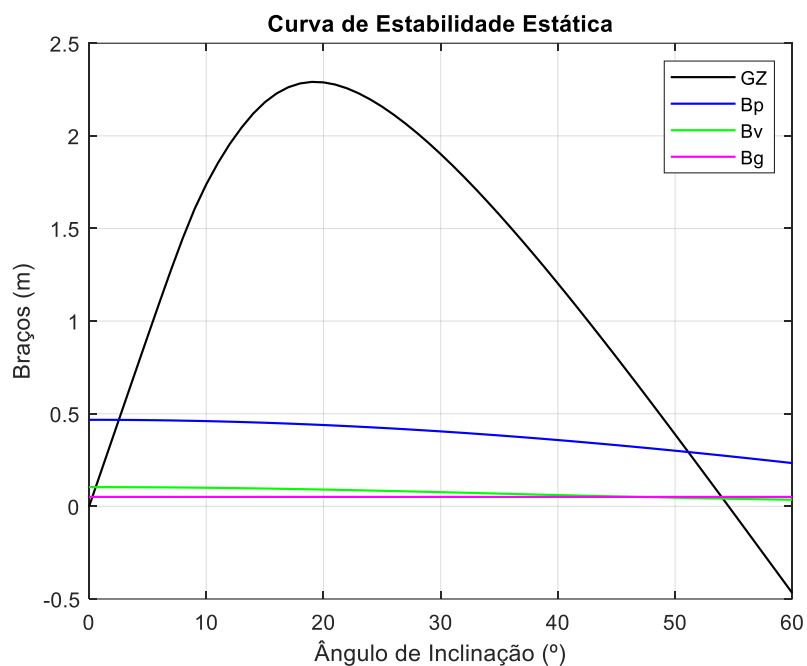


Figura 5.5. Curva de estabilidade estática da condição 3, na opção A

Tabela 5.8. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 3, na opção A.

Item	Critério	Comercial	Calculado	Erro (%)	Requisito
$\theta_c$			12,105 °		
$\theta_f$	$\geq 25^\circ$		48,408 °		Aprovado
$GM_o$	$\geq 0,35$ m	10,524 m	10,323 m	1,906%	Aprovado
$GZ_{m\acute{a}x}$	$\geq 0,1$ m	2,303 m	2,291 m	0,509%	Aprovado
$\theta_p$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	2,515 °	2,537 °	0,861%	Aprovado
$A_A$		0,010 m.rad	0,010 m.rad	3,446%	
$A_B$		0,895 m.rad	0,886 m.rad	1,054%	
$A_B > A_A$					Aprovado
$\theta_v$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,562 °	0,565 °	0,453%	Aprovado
$A_A$		0,001 m.rad	0,001 m.rad	2,405%	
$A_B$		1,123 m.rad	1,115 m.rad	0,736%	
$A_B > A_A$					Aprovado
$\theta_g$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,274 °	0,277 °	1,191%	Aprovado
$A_A$		0,000 m.rad	0,000 m.rad	1,000%	
$A_B$		1,149 m.rad	1,140 m.rad	0,778%	
$A_B > A_A$					Aprovado

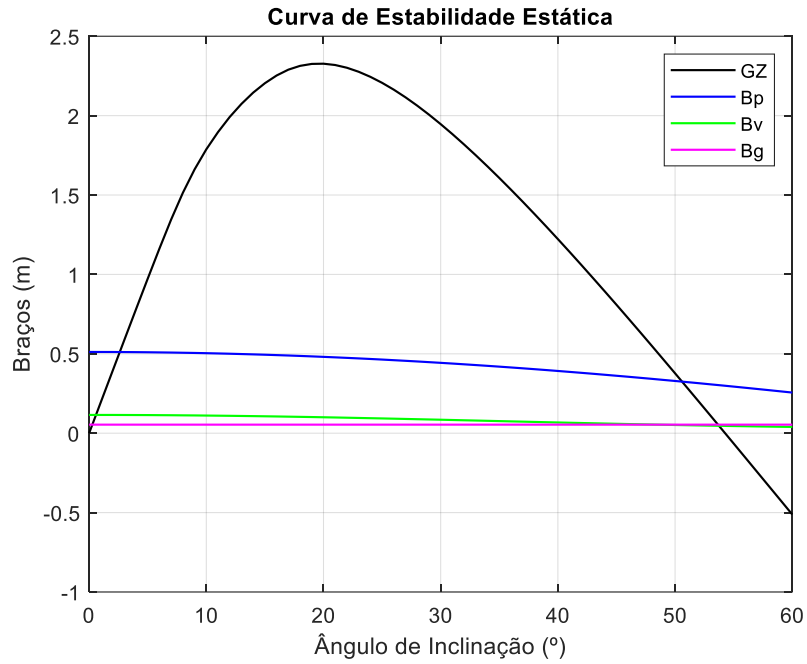


Figura 5.6. Curva de estabilidade estática da condição 4, na opção A.

Tabela 5.9. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 4, na opção A.

Item	Critério	Comercial	Calculado	Erro (%)	Requisito
$\theta_c$			12,651 °		
$\theta_f$	$\geq 25^\circ$		49,061 °		Aprovado
$GM_o$	$\geq 0,35$ m	11,171 m	10,959 m	1,900%	Aprovado
$GZ_{m\acute{a}x}$	$\geq 0,1$ m	2,339 m	2,327 m	0,511%	Aprovado
$\theta_p$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	2,594 °	2,615 °	0,815%	Aprovado
$A_A$		0,012 m.rad	0,012 m.rad	2,729%	
$A_B$		0,895 m.rad	0,885 m.rad	1,072%	
$A_B > A_A$					Aprovado
$\theta_v$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,586 °	0,588 °	0,286%	Aprovado
$A_A$		0,001 m.rad	0,001 m.rad	41,013%	
$A_B$		1,143 m.rad	1,135 m.rad	0,672%	
$A_B > A_A$					Aprovado
$\theta_g$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,272 °	0,275 °	1,240%	Aprovado
$A_A$		0,000 m.rad	0,000 m.rad	1,000%	
$A_B$		1,174 m.rad	1,165 m.rad	0,757%	
$A_B > A_A$					Aprovado

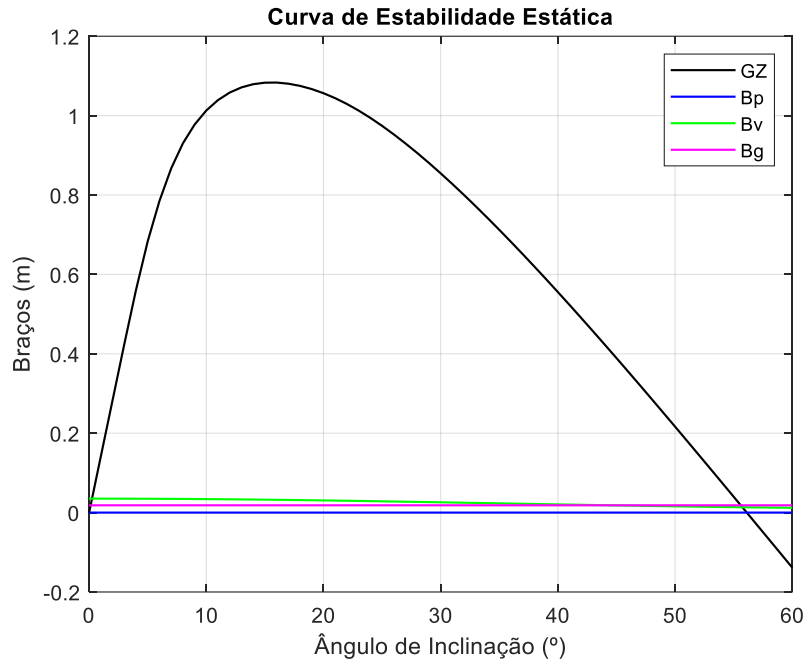


Figura 5.7. Curva de estabilidade estática da condição 5, na opção A.

Tabela 5.10. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 5, na opção A.

Item	Critério	Comercial	Calculado	Erro (%)	Requisito
$\theta_c$			3,743 °		
$\theta_f$	$\geq 25^\circ$		36,352 °		Aprovado
$GM_o$	$\geq 0,35$ m	8,386 m	7,981 m	4,834%	Aprovado
$GZ_{m\acute{a}x}$	$\geq 0,1$ m	1,215 m	1,083 m	10,841%	Aprovado
$\theta_p$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$		0,000 °		Aprovado
$A_A$			0,000 m.rad		
$A_B$			0,548 m.rad		
$A_B > A_A$					Aprovado
$\theta_v$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,244 °	0,248 °	1,457%	Aprovado
$A_A$		0,000 m.rad	0,000 m.rad	1,000%	
$A_B$		0,440 m.rad	0,528 m.rad	20,094%	
$A_B > A_A$					Aprovado
$\theta_g$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,106 °	0,129 °	21,840%	Aprovado
$A_A$		0,000 m.rad	0,000 m.rad	1,000%	
$A_B$		0,448 m.rad	0,536 m.rad	19,663%	
$A_B > A_A$					Aprovado



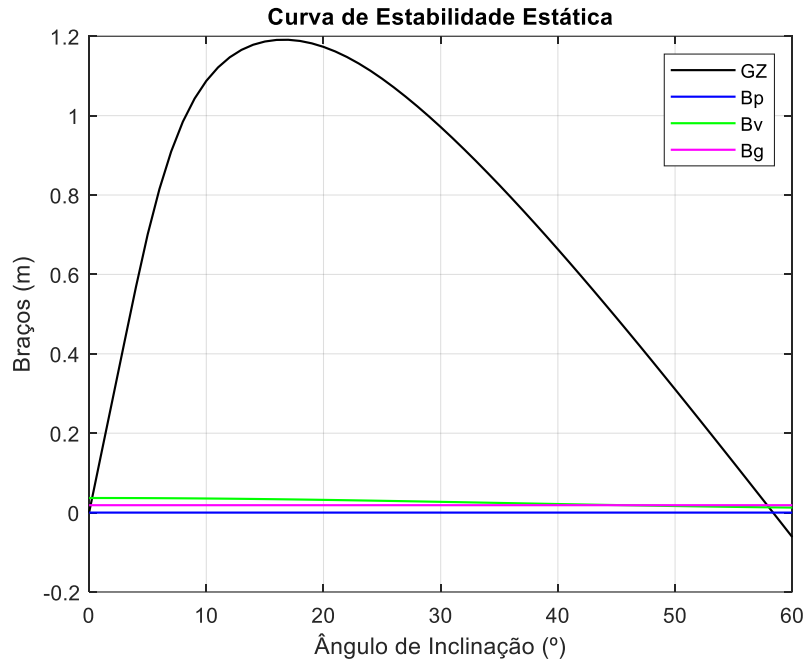


Figura 5.8. Curva de estabilidade estática da condição 6, na opção A.

Tabela 5.11. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 6, na opção A.

Item	Critério	Comercial	Calculado	Erro (%)	Requisito
$\theta_c$			4,161 °		
$\theta_f$	$\geq 25^\circ$		37,059 °		Aprovado
$GM_o$	$\geq 0,35$ m	8,490 m	8,079 m	4,838%	Aprovado
$GZ_{m\acute{a}x}$	$\geq 0,1$ m	1,331 m	1,191 m	10,515%	Aprovado
$\theta_p$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$		0,000 °		Aprovado
$A_A$			0,000 m.rad		
$A_B$			0,613 m.rad		
$A_B > A_A$					Aprovado
$\theta_v$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,253 °	0,256 °	1,307%	Aprovado
$A_A$		0,000 m.rad	0,000 m.rad	1,000%	
$A_B$		0,510 m.rad	0,592 m.rad	16,138%	
$A_B > A_A$					Aprovado
$\theta_g$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,106 °	0,130 °	22,385%	Aprovado
$A_A$		0,000 m.rad	0,000 m.rad	1,000%	
$A_B$		0,519 m.rad	0,601 m.rad	15,750%	
$A_B > A_A$					Aprovado

A seguir, nas Figuras 5.9 a 5.14 são apresentadas as curvas de estabilidade intacta para a opção B e nas Tabelas 5.12 a 5.17 são apresentados os resultados para a avaliação dos critérios também para a opção B.

Os resultados obtidos também foram verificados com os resultados obtidos pelo software comercial, apresentando que as alturas metacêntricas calculadas foram verificadas com os dados obtidos com erros menores que 5,18%, enquanto os máximos braços de endireitamento comparados com o comercial foram menores que 18,27%.

Os erros dos ângulos de equilíbrio estático devido a passageiros foram menores que 3,69%, os erros dos cálculos das áreas da curva de estabilidade estática foram menores que 4,76% para a área A e 1,44% para a área B.

Os erros dos ângulos de equilíbrio estático devido ao vento foram menores que 3,10%, os erros dos cálculos das áreas da curva de estabilidade estática também foram expressivos devido a dimensão dos números e resultou em erros menores que 38,92% para a área A e 29,33% para a área B.

Por fim, os erros dos ângulos de equilíbrio estático devido a guinada foram menores que 26,25%, o resultado foi expressivo também devido a dimensão do resultado. Os erros dos cálculos das áreas da curva de estabilidade estática foram menores que 1,0% para a área A e 28,60% para a área B.

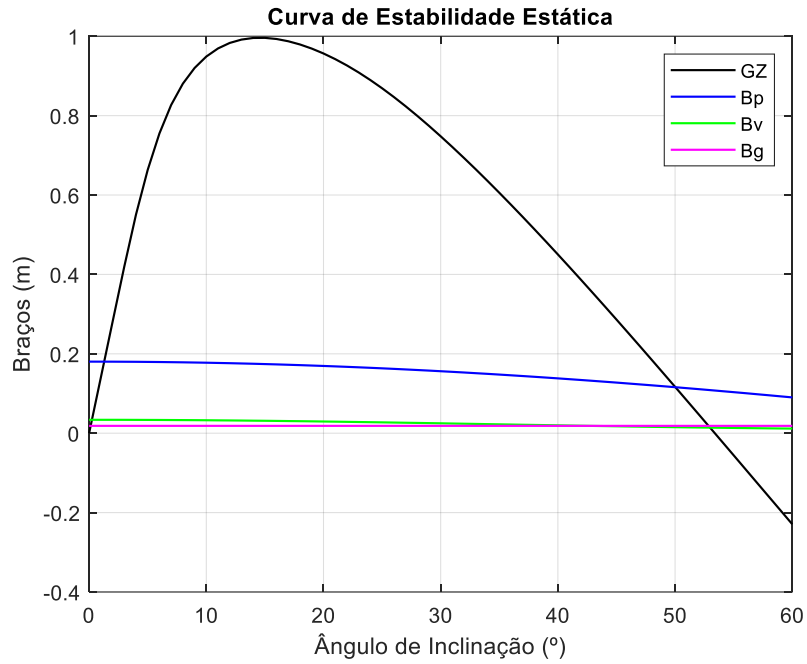


Figura 5.9. Curva de estabilidade da condição 1, na opção B.

Tabela 5.12. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 1, na opção B.

Item	Critério	Comercial	Calculado	Erro (%)	Requisito
$\theta_c$			3,422 °		
$\theta_f$	$\geq 25^\circ$		35,801 °		Aprovado
$GM_o$	$\geq 0,35$ m	8,267 m	7,871 m	4,784%	Aprovado
$GZ_{m\acute{a}x}$	$\geq 0,1$ m	1,065 m	0,993 m	6,741%	Aprovado
$\theta_p$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	1,240 °	1,286 °	3,696%	Aprovado
$A_A$		0,002 m.rad	0,002 m.rad	1,034%	
$A_B$		0,392 m.rad	0,388 m.rad	0,975%	
$A_B > A_A$					Aprovado
$\theta_v$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,247 °	0,241 °	2,563%	Aprovado
$A_A$		0,000 m.rad	0,000 m.rad	1,000%	
$A_B$		0,462 m.rad	0,473 m.rad	2,426%	
$A_B > A_A$					Aprovado
$\theta_g$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,114 °	0,132 °	15,508%	Aprovado
$A_A$		0,000 m.rad	0,000 m.rad	1,000%	
$A_B$		0,470 m.rad	0,480 m.rad	2,128%	
$A_B > A_A$					Aprovado

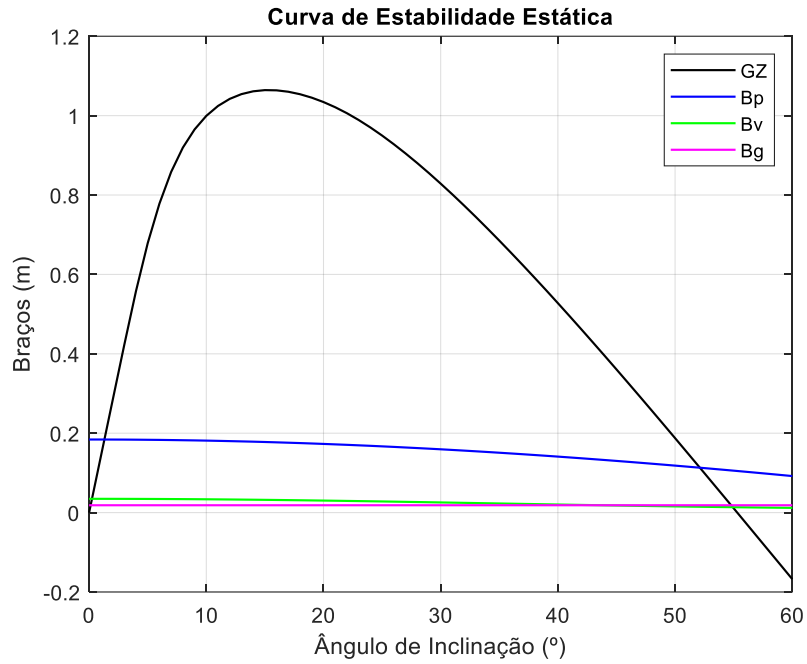


Figura 5.10. Curva de estabilidade da condição 2, na opção B.

Tabela 5.13. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 2, na opção B.

Item	Critério	Comercial	Calculado	Erro (%)	Requisito
$\theta_c$			3,689 °		
$\theta_f$	$\geq 25^\circ$		36,261 °		Aprovado
$GM_o$	$\geq 0,35$ m	8,329 m	7,946 m	4,595%	Aprovado
$GZ_{m\acute{a}x}$	$\geq 0,1$ m	1,138 m	1,064 m	6,506%	Aprovado
$\theta_p$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	1,335 °	1,306 °	2,201%	Aprovado
$A_A$		0,002 m.rad	0,002 m.rad	4,761%	
$A_B$		0,433 m.rad	0,428 m.rad	1,068%	
$A_B > A_A$					Aprovado
$\theta_v$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,252 °	0,245 °	2,673%	Aprovado
$A_A$		0,000 m.rad	0,000 m.rad	1,000%	
$A_B$		0,507 m.rad	0,516 m.rad	1,805%	
$A_B > A_A$					Aprovado
$\theta_g$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,114 °	0,131 °	14,614%	Aprovado
$A_A$		0,000 m.rad	0,000 m.rad	1,000%	
$A_B$		0,516 m.rad	0,523 m.rad	1,450%	
$A_B > A_A$					Aprovado

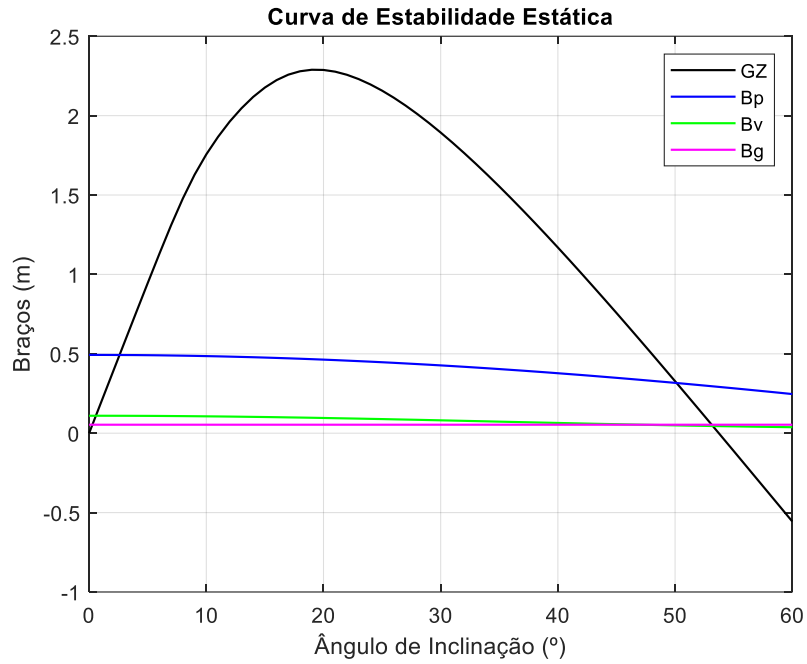


Figura 5.11. Curva de estabilidade da condição 3, na opção B.

Tabela 5.14. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 3, na opção B.

Item	Critério	Comercial	Calculado	Erro (%)	Requisito
$\theta_c$			12,418 °		
$\theta_f$	$\geq 25^\circ$		48,784 °		Aprovado
$GM_o$	$\geq 0,35$ m	10,827 m	10,605 m	2,052%	Aprovado
$GZ_{m\acute{a}x}$	$\geq 0,1$ m	2,276 m	2,289 m	0,575%	Aprovado
$\theta_p$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	2,608 °	2,594 °	0,550%	Aprovado
$A_A$		0,011 m.rad	0,011 m.rad	1,171%	
$A_B$		0,858 m.rad	0,870 m.rad	1,442%	
$A_B > A_A$					Aprovado
$\theta_v$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,584 °	0,578 °	0,966%	Aprovado
$A_A$		0,001 m.rad	0,001 m.rad	10,690%	
$A_B$		1,101 m.rad	1,111 m.rad	0,924%	
$A_B > A_A$					Aprovado
$\theta_g$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,282 °	0,281 °	0,228%	Aprovado
$A_A$		0,000 m.rad	0,000 m.rad	0,976%	
$A_B$		1,128 m.rad	1,138 m.rad	0,907%	
$A_B > A_A$					Aprovado

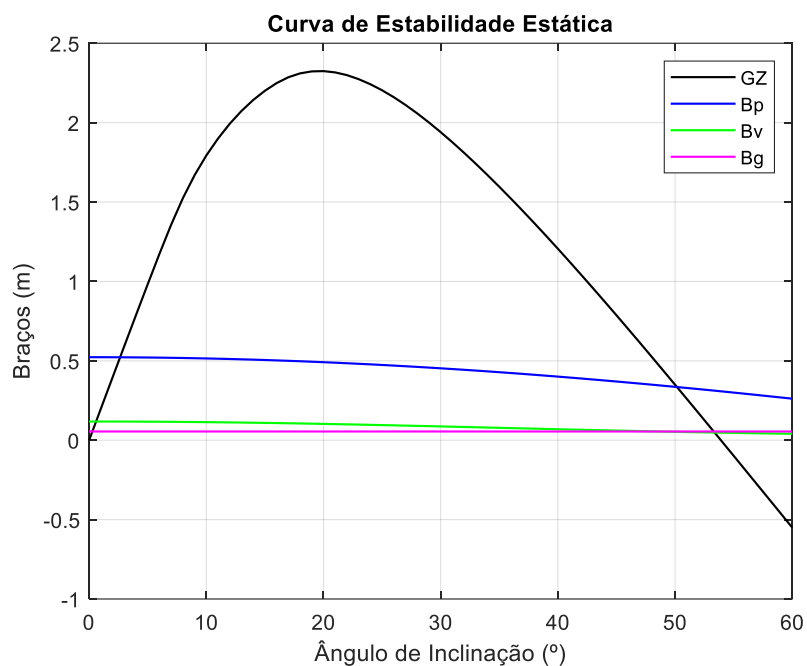


Figura 5.12. Curva de estabilidade da condição 4, na opção B.

Tabela 5.15. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 4, na opção B.

Item	Critério	Comercial	Calculado	Erro (%)	Requisito
$\theta_c$			12,774 °		
$\theta_f$	$\geq 25^\circ$		49,206 °		Aprovado
$GM_o$	$\geq 0,35$ m	11,359 m	11,097 m	2,305%	Aprovado
$GZ_{m\acute{a}x}$	$\geq 0,1$ m	2,319 m	2,324 m	0,234%	Aprovado
$\theta_p$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	2,657 °	2,645 °	0,461%	Aprovado
$A_A$		0,012 m.rad	0,012 m.rad	0,475%	
$A_B$		0,870 m.rad	0,877 m.rad	0,819%	
$A_B > A_A$					Aprovado
$\theta_v$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,600 °	0,595 °	0,839%	Aprovado
$A_A$		0,001 m.rad	0,001 m.rad	38,921%	
$A_B$		1,127 m.rad	1,132 m.rad	0,460%	
$A_B > A_A$					Aprovado
$\theta_g$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,278 °	0,277 °	0,270%	Aprovado
$A_A$		0,000 m.rad	0,000 m.rad	0,942%	
$A_B$		1,159 m.rad	1,163 m.rad	0,334%	
$A_B > A_A$					Aprovado

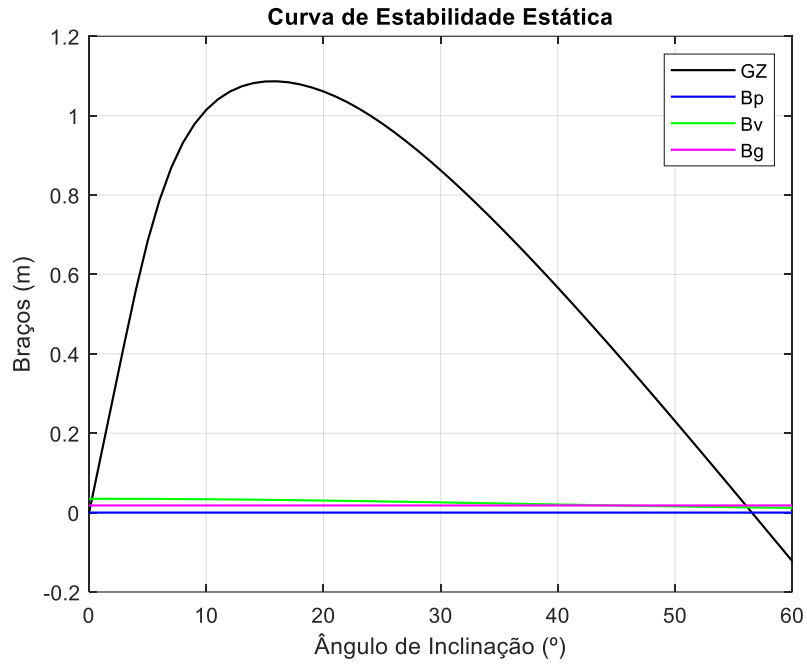


Figura 5.13. Curva de estabilidade da condição 5, na opção B.

Tabela 5.16. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 5, na opção B.

Item	Critério	Comercial	Calculado	Erro (%)	Requisito
$\theta_c$			3,721 °		
$\theta_f$	$\geq 25^\circ$		36,314 °		Aprovado
$GM_o$	$\geq 0,35$ m	8,435 m	7,998 m	5,184%	Aprovado
$GZ_{m\acute{a}x}$	$\geq 0,1$ m	1,326 m	1,084 m	18,270%	Aprovado
$\theta_p$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$				N/A
$A_A$					
$A_B$					
$A_B > A_A$					N/A
$\theta_v$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,251 °	0,244 °	2,734%	Aprovado
$A_A$		0,000 m.rad	0,000 m.rad	0,062%	
$A_B$		0,512 m.rad	0,530 m.rad	3,428%	
$A_B > A_A$					Aprovado
$\theta_g$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,109 °	0,126 °	15,712%	Aprovado
$A_A$		0,000 m.rad	0,000 m.rad	0,872%	
$A_B$		0,520 m.rad	0,537 m.rad	3,317%	
$A_B > A_A$					Aprovado

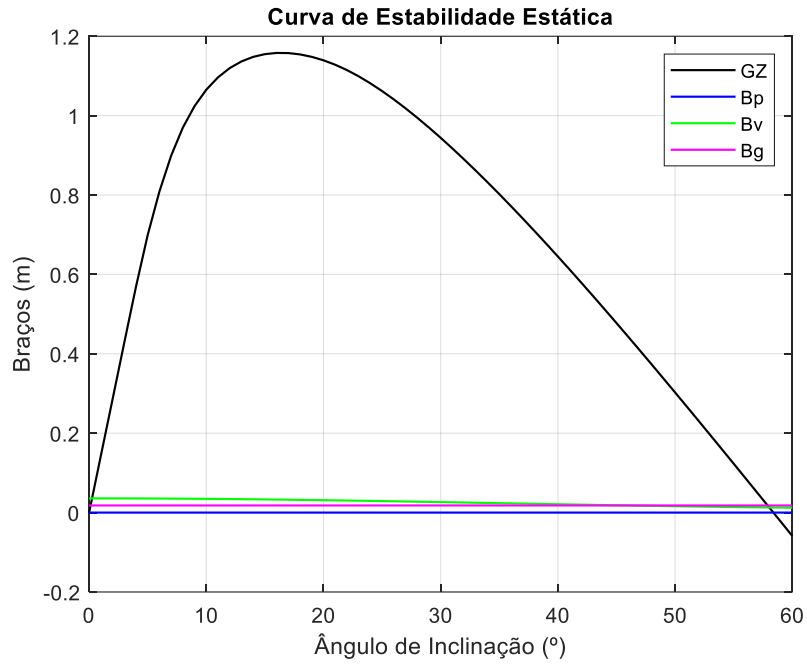


Figura 5.14. Curva de estabilidade da condição 6, na opção B.

Tabela 5.17. Avaliação dos critérios de estabilidade para a condição 6, na opção B.

Item	Critério	Comercial	Calculado	Erro (%)	Requisito
$\theta_c$			3,990 °		
$\theta_f$	$\geq 25^\circ$		36,771 °		Aprovado
$GM_o$	$\geq 0,35$ m	8,452 m	8,076 m	4,443%	Aprovado
$GZ_{m\acute{a}x}$	$\geq 0,1$ m	1,230 m	1,158 m	5,884%	Aprovado
$\theta_p$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$				N/A
$A_A$					
$A_B$					
$A_B > A_A$					N/A
$\theta_v$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,242 °	0,250 °	3,107%	Aprovado
$A_A$		0,000 m.rad	0,000 m.rad	0,648%	
$A_B$		0,444 m.rad	0,574 m.rad	29,336%	
$A_B > A_A$					Aprovado
$\theta_g$	$\leq \theta_c$ ou $15^\circ$	0,099 °	0,125 °	26,259%	Aprovado
$A_A$		0,000 m.rad	0,000 m.rad	0,761%	
$A_B$		0,453 m.rad	0,583 m.rad	28,605%	
$A_B > A_A$					Aprovado



#### 5.4 Viabilidade econômica

As duas opções em consideração para a análise da implementação do GNL na forma de combustível têm como principal objetivo a redução dos custos associados ao combustível. Nesse sentido, foi conduzida uma análise da viabilidade econômica, a fim de avaliar o impacto direto sobre a margem de lucro comparado ao óleo diesel. A partir de informações coletadas com empresas de navegação da região, o óleo diesel marítimo cotado no mês de novembro de 2023, estava no valor de R\$ 6,10/L. Assim, com os tanques de diesel dimensionados determinou-se o custo para uma viagem. Na Tabela 5.18 são apresentados os valores para as rotações que a embarcação opera.

Tabela 5.18. Custo atual com diesel.

Sentido da navegação	RPM	Custo de combustível
Montante	1600	R\$ 65.638,44
Jusante	1300	R\$ 19.308,94
<b>Total</b>		R\$ 84.947,38

A partir dos volumes calculados para o GN no item 5.1, a avaliação do custo de combustível do GNL foi a partir do volume de GN utilizado na mistura com a cotação da ANP no mês de novembro de 2023 do gás natural veicular (GNV), no valor de R\$ 4,49/m<sup>3</sup>. Na Tabela 5.19 são apresentados os custos de combustível para a opção A e B, observa-se que a opção com maior economia de combustível é a opção A, com redução de 14,09% por viagem, enquanto a opção B é reduzido apenas 10,88%.

Tabela 5.19. Custo de combustível para as opções A e B.

Sentido da navegação	RPM	Opção A		Opção B	
		Diesel	GNL	Diesel	GNL
Montante	1600	R\$ 13.137,89	R\$ 43.262,09	R\$ 13.137,89	R\$ 43.262,09
Jusante	1300	R\$ 3.861,94	R\$ 12.717,08	R\$ 19.308,94	-
<b>Custo Total</b>		R\$ 72.979,00		R\$ 75.708,92	

A receita que o *ferryboat* tem por viagem, foi calculado a partir da Eq. (3.20), sendo que os preços do frete e da passagem foram obtidos no levantamento de dados

realizado a bordo da embarcação, como o preço da passagem varia se é camarote ou rede e o trecho escolhido, foi definido o preço médio da passagem em R\$ 338,13 /passageiro e o preço médio do frete R\$ 400,00 /t. Assim, na Tabela 5.20 são apresentadas as receitas para cada opção e os lucros.

Tabela 5.20. Lucro das opções A e B.

	<b>Opção A</b>	<b>Opção B</b>
Receita	R\$ 308.315,00	R\$ 314.315,00
Custo de combustível	R\$ 72.979,00	R\$ 75.708,92
Lucro	R\$ 235.336,00	R\$ 238.606,08

Observa-se na Tabela 5.20 que devido as dimensões dos tanques de GNL, a receita da opção A foi impactada com uma redução de 15 t no transporte de carga, resultando em um lucro de 2,60 % por viagem. No entanto, a opção B não houve impacto no frete da embarcação, e se tornando a opção mais viável economicamente com um lucro de 4,03% por viagem, assim na Figura 5.15 apresenta o arranjo dos tanques de GNL no interior do casco.

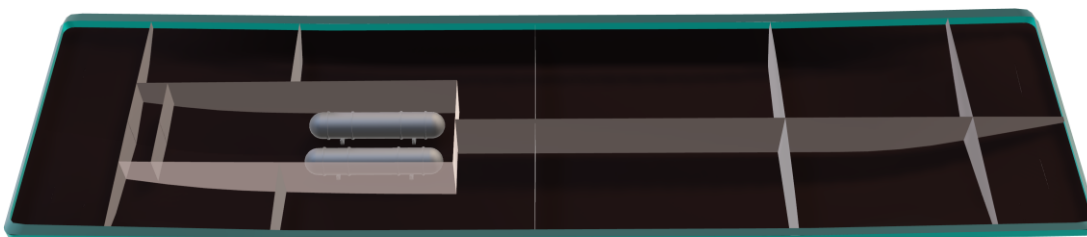


Figura 5.15. Arranjo dos tanques para a opção B.

## 5.5 Recomendação de Motor Bicombustível

A transição do uso de GNL na forma bicombustível implica na conversão do motor de combustão interna ou substituí-lo por um motor bicombustível original de fábrica. A conversão dos motores atuais para ter a mistura de GN e óleo diesel, é vantajosa devido dispensar a compra de um novo motor. No entanto, os motores bicombustíveis são realizados para proporcionar a flexibilidade necessária para operar tanto com óleo diesel quanto com GN.

Essa versatilidade não apenas permite uma transição gradual e adaptável de combustíveis das embarcações da região amazônica, mas também se destaca como uma

estratégia eficaz na mitigação de desafios logísticos e econômicos associados à substituição completa do óleo diesel. A opção de incorporar motores bicombustível se torna vantajoso para a construção de novas embarcações, assim as empresas podem otimizar sua eficiência operacional e contribuir para uma transição mais sustentável.

De forma a avaliar a opção de implementar este tipo de motores, foram encontrados três fabricantes, cujas potências se aproximavam da potência atual instalada no *ferryboat* estudado neste trabalho, conforme detalhado na Tabela 5.21. No entanto, ao tomar esta decisão, deve-se considerar a opção que melhor se adapta, visando mapear tanto as restrições dimensionais quanto os custos de implementação.

Tabela 5.21. Fabricantes de motores duplo combustivel.

<b>Fabricante</b>	<b>Modelo</b>	<b>Potência (kW)</b>
Yanmar	6EY26DF	1533
MAN	5L23/30DF	625
Wärtsilä	6L20DF	1110

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho apresenta uma análise da viabilidade técnica e econômica da aplicação de GNL como combustível alternativo em embarcações do tipo *ferryboat* que transporta passageiros e carga no Rio Solimões entre as cidades de Manaus a Tabatinga, no estado do Amazonas, de forma a apresentar as vantagens e os desafios encontrados. O trabalho auxilia os armadores na tomada de decisões relacionadas quanto ao uso, efetividade, riscos e custos associados ao GNL na forma de combustível, oferecendo uma solução de baixos níveis de emissões de poluentes para a região.

O estudo evidencia que a utilização do gás natural como combustível principal para embarcações se torna vantajosa na forma de GNL, devido à redução considerável do seu volume para o armazenamento. Além de que a instalação dos tanques de armazenamento de GNL em uma embarcação tipo *ferryboat* apresenta vantagens consideráveis, principalmente devido às suas grandes dimensões e o espaço disponível para a instalação desses tanques.

Após a adição do peso dos tanques de GNL, o *ferryboat* atende a todos os critérios de estabilidade intacta para as seis condições de carregamento propostas pela NORMAM 202/DPC (2023), mostrando braços de emborcamento em relação as ações devido ao acúmulo de passageiros em um bordo, vento e guinada na curva de estabilidade estática corrigida com o momento de superfície livre. Além do código desenvolvido no MATLAB apresentar desvios que podem ser considerados desprezíveis, quando comparados com os resultados do software comercial.

A conversão do *ferryboat* movido a óleo diesel para a utilização de GNL como combustível concluiu ser economicamente viável, mas depende de diversos fatores, como o preço do GNL, a distância da viagem e o espaço disponível para a instalação do tanque de armazenamento. As propostas para dimensionar os tanques de armazenamento demonstram que em apenas um dos casos de estudo não há impacto na capacidade de transporte de carga, devido à diferença na densidade dos combustíveis que compensa na condição de carregamento total e a instalação de tanques menores.

A proposta de conversão da embarcação para um combustível alternativo demonstra viabilidade econômica mediante a comparação dos custos de combustível entre os dois tipos, visto que, no cenário em que o *ferryboat* realiza apenas a viagem de ida abastecido com GNL resulta em um lucro de 4,03% por viagem em comparação com

o uso do óleo diesel como combustível principal durante toda a rota. Além disso, essa decisão viabiliza a redução dos custos de frete e passagem, visando beneficiar os ribeirinhos que dependem do transporte fluvial.

Diante dos resultados encontrados, a proposta para a conversão de combustível demonstra desafios para a implementação, visto que o uso de GNL necessita de incentivos públicos e regulamentares para o incentivo a utilização desse combustível alternativo. Além disso, recomenda-se considerar trabalhos futuros que se dediquem a estudar e propor uma análise logística abrangente para a distribuição do GNL, a fim de desenvolver e viabilizar futuros pontos de abastecimento no interior do estado, visto que atualmente há a carência da disponibilidade para o abastecimento durante a viagem.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEZIRIS, O.; KOROMILA, I.; NIVOLIANITOU, Z. A systematic literature review on LNG safety at ports. **Safety Science**, v. 124, p. 104595, 2020.

ANP, A. N. DO P., Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Brasil: 2023.

AREFIN, M. A. et al. A Review on Liquefied Natural Gas as Fuels for Dual Fuel Engines: Opportunities, Challenges and Responses. **Energies**, v. 13, n. 22, 2020.

ATTWOOD, E. L. **Theoretical Naval Architecture**. New York, NY, USA: Longmans, 1922.

BARRAS, B.; DERRETT, D. R. **Ship Stability for Masters and Mates**. Sixth edition ed. Oxford: Elsevier, 2006.

BIRAN, A.; LÓPEZ-PULIDO, R. (EDS.). Ship Hydrostatics and Stability. Em: **Ship Hydrostatics and Stability (Second Edition)**. Second Edition ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. p. i.

BUDIYANTO, M. A. et al. Study on the Performance Analysis of Dual Fuel Engines on the Medium Speed Diesel Engine. **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences**, 2020.

CALIGIURI, C.; RENZI, M. Combustion modelling of a dual fuel diesel – producer gas compression ignition engine. **Energy Procedia**, v. 142, p. 1395–1400, 2017.

DNV. **Alternative Fuels for Containerships: LNG, methanol extended, ammonia**. 27 nov. 2023.

FAN, H.; ENSHAEI, H.; JAYASINGHE, S. G. Safety philosophy and risk analysis methodology for LNG bunkering simultaneous operations (SIMOPs): A literature review. **Safety Science**, v. 136, p. 105150, 2021.

FOKKEMA, J. E.; BUIJS, P.; VIS, I. F. A. An investment appraisal method to compare LNG-fueled and conventional vessels. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 56, p. 229–240, 2017.

IANNACCONE, T. et al. Sustainability of cruise ship fuel systems: Comparison among LNG and diesel technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 260, p. 121069, 2020.

JAFARZADEH, S. et al. LNG-fuelled fishing vessels: A systems engineering approach. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 50, p. 202–222, 2017.

LEE, H.-J.; YOO, S.-H.; HUH, S.-Y. Economic benefits of introducing LNG-fuelled ships for imported flour in South Korea. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 78, p. 102220, 2020.

LEWIS, E. V. **Principles of Naval Architecture**. Jersey City: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988.

LIM, K.-G.; LIM, M. Financial performance of shipping firms that increase LNG carriers and the support of eco-innovation. **Journal of Shipping and Trade**, v. 5, n. 1, p. 23, 16 nov. 2020.

MERIEN-PAUL, R. H.; ENSHAEI, H.; JAYASINGHE, S. G. Effects of fuel-specific energy and operational demands on cost/emission estimates: A case study on heavy fuel-oil vs liquefied natural gas. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 69, p. 77–89, 2019.

NORMAM 202/DPC. Normas da Autoridade Marítima para Embarcações Empregadas na Navegação Interior. . 2023.

SEUNG-MAN HA, J.-H. C., Won-Ju Lee, Byongug Jeong; KANG, J. Regulatory gaps between LNG carriers and LNG fuelled ships. **Journal of Marine Engineering & Technology**, v. 21, n. 1, p. 23–37, 2020.

SHAO, Y. et al. A preliminary risk assessment on development the fuel gas supply system of a small LNG fueled fishing ship. **Ocean Engineering**, v. 258, p. 111645, 2022.

WAN, C. et al. A novel policy making aid model for the development of LNG fuelled ships. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 119, p. 29–44, 2019.

WANG, C.; JU, Y.; FU, Y. Comparative life cycle cost analysis of low pressure fuel gas supply systems for LNG fueled ships. **Energy**, v. 218, p. 119541, 2021.

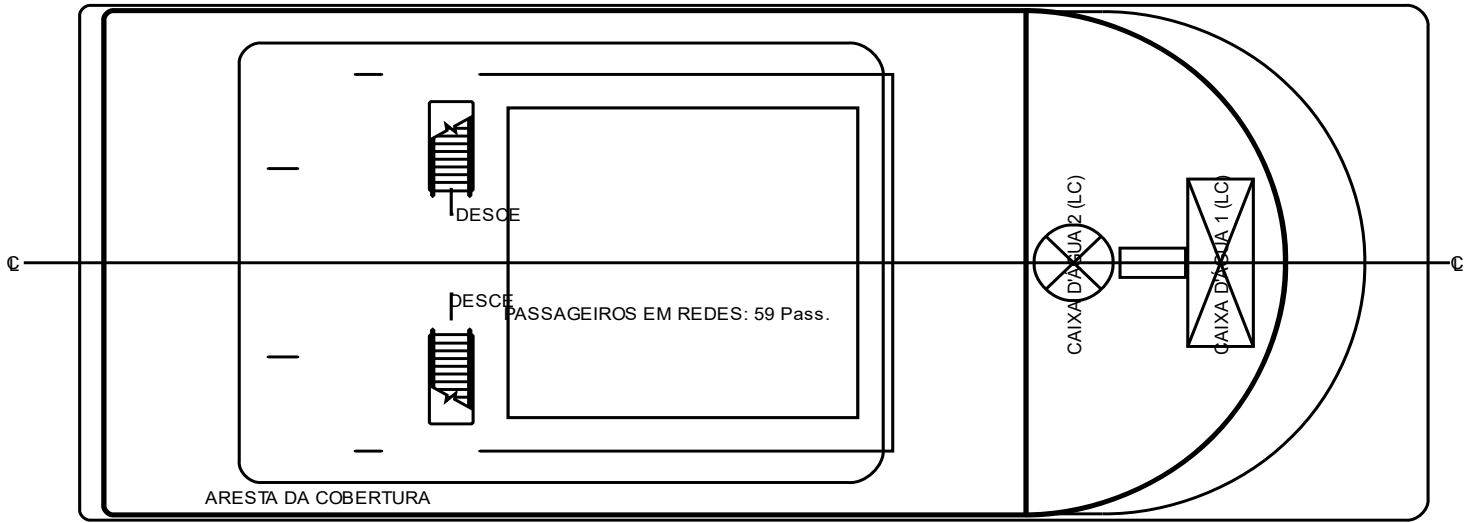
XU, H.; YANG, D. LNG-fuelled container ship sailing on the Arctic Sea: Economic and emission assessment. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 87, p. 102556, 2020.

YANG, R. et al. A numerical fire simulation approach for effectiveness analysis of fire safety measures in floating liquefied natural gas facilities. **Ocean Engineering**, v. 157, p. 219–233, 2018.

YOO, B.-Y. Economic assessment of liquefied natural gas (LNG) as a marine fuel for CO<sub>2</sub> carriers compared to marine gas oil (MGO). **Energy**, v. 121, p. 772–780, 2017.







VISTADO CONVÉS SUPERIOR

**ANEXO B – TABELA DE CAPACIDADES DO FERRYBOAT**

<b>Componente</b>	<b>Peso (t)</b>	<b>LCG (m)</b>	<b>VCG (m)</b>	<b>TCG (m)</b>
Embarcação leve	238,900	23,700	4,756	0,000
C. Principal (04 - tripulantes + pertences em camarotes)	0,400	28,688	3,400	0,000
C. Principal (07 - passageiros + pertences em camarotes)	0,700	23,200	3,400	0,000
C. Principal (151 - passageiros em redes)	11,325	15,800	3,400	0,000
C. Principal (02 - cadeirantes)	0,150	23,200	3,400	0,000
Bagageiro - Convés Principal	6,800	23,200	3,723	1,250
C. Principal (viveres e gêneros)	1,000	4,500	3,870	0,000
C. Passadiço (04 - tripulantes + pertences em camarotes)	0,400	26,600	5,900	0,000
C. Passadiço (06 - passageiros + pertences em camarotes)	0,600	24,000	5,900	0,000
C. Passadiço (119 - passageiros em redes)	8,925	15,300	5,900	0,000
C. Superior (59 - passageiros em redes)	4,425	13,650	8,300	0,000
Tanque de diesel (LC)	21,869	2,259	1,918	0,000
Porão de carga 1 (32,78 t de carga) + 4,45 t de Bagagem (BB/BE)	35,000	6,000	1,653	0,000
Porão de carga 2 (BB/BE)	180,000	16,000	1,329	0,000
Câmara fria (BB/BE)	180,000	27,705	1,320	0,000
Porão de carga 3 (BB/BE)	100,000	37,861	1,601	0,000
Caixa d'água 1 (LC)	4,256	25,950	7,875	0,000
Caixa d'água 2 (LC)	1,832	22,588	7,700	0,000
Carga no convés (MN)	0,000	16,780	3,650	0,000
Carga no convés (Proa - Carga seca ou 15 veículos)	30,000	14,297	3,830	0,000

LCG: Referência a perpendicular de ré, VCG: Referência a linha de base e TCG: referência a linha de centro.