PERSPECTIVAS PARA O GÁS NATURAL NA CABOTAGEM BRASILEIRA

Matheus Richter Poggio de Carvalho

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Planejamento Energético.

Orientadores: Alexandre Salem Szklo
Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2020

PERSPECTIVAS PARA O GÁS NATURAL NA CABOTAGEM BRASILEIRA

Matheus Richter Poggio de Carvalho

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Orientadores: Alexandre Salem Szklo
Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Examinada por: Prof. Alexandre Salem Szklo
Prof. Pedro Rua Rodriguez Rochedo
Prof. Jean David Job Emmanuel Marie Caprace
Prof. Marcelo Colomer Ferraro

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
FEVEREIRO DE 2020

Carvalho, Matheus Richter Poggio de

Perspectivas para o gás natural na cabotagem brasileira/Matheus Richter Poggio de Carvalho. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020.

XV, 91 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Planejamento Energético, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 78 – 83.

1. Cabotagem. 2. Gás Natural Liquefeito. 3. Modelo. I. Szklo, Alexandre Salem *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

"This world doesn't need a hero. It needs a professional."
-Geralt of Rivia

"Wyrd bid ful āræd. Fate is inexorable."
-Uhtred of Bebbanburg

"We can't change what's done, we can only move on."
-Arthur Morgan

"Part of the journey is the end."
-Tony Stark

"Estamos em outro patamar."
-Bruno Henrique

"The most important thing is to try and inspire people
so that they can be great in whatever they want to do."
-Kobe Bryant

"To make a decision you need to be in a perfect environment:
so that they can be great in whatever they want to do
you have to be motivated and surrounded by the right people."
-Niki Lauda

We're going to get older, whether we like it or not,
so the only question is whether we get on with
our lives or desperately cling to the past."
-Ted Mosby

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa de estudos.

Aos meus orientadores Alexandre e Pedro

À minha Família

A todos do Cenergia

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

PERSPECTIVAS PARA O GÁS NATURAL NA CABOTAGEM BRASILEIRA

Matheus Richter Poggio de Carvalho

Fevereiro/2020

Orientadores: Alexandre Salem Szklo
Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Programa: Planejamento Energético

Apesar dos menores custos de frete e menores emissões de poluentes, a cabotagem não é o modal da matriz de transporte brasileira mais utilizado. Atualmente, a cabotagem representa 9% da carga transportada em toneladas no Brasil. Os navios utilizam, normalmente, um combustível chamado *Heavy fuel oil (HFO)* ou, simplesmente, bunker, e, nos últimos anos começaram a surgir navios movimentados a gás natural liquefeito (GNL). Neste trabalho, avalia-se o potencial de penetração de GNL na cabotagem brasileira em 2030 e seus custos associados. Para tal, recorre-se a um modelo *bottom-up* da movimentação de cargas nos principais portos a partir da qual se desenlevem cenários de penetração do GNL. No cenário gás superior, a consumo de gás natural atingiu 4,8 Mm^3/dia, o que representaria em torno de 3 vezes o consumo do mercado residencial. A faixa de preços encontrada para que a penetração seja possível foi 158 a 299 dólares por tonelada dependendo da taxa de desconto.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PROSPECTS FOR NATURAL GAS IN BRAZILIAN CABOTAGE

Matheus Richter Poggio de Carvalho

February/2020

Advisors: Alexandre Salem Szklo
Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Department: Energy Planning

Despite lower freight costs and lower emissions of pollutants, cabotage is not the most used mode of the Brazilian transport matrix. Currently, cabotage represents 9% of the cargo transported in tons in Brazil. The ships normally use a fuel called Heavy fuel oil (HFO) or, simply, bunker, and, in recent years, liquefied natural gas (LNG) ships have started to emerge. In this work, the potential for penetrating LNG into Brazilian cabotage in 2030 and its associated costs is assessed. For this purpose, a botton up model of cargo handling is used in the main ports from which LNG penetration scenarios are developed. In the upper gas scenario, natural gas consumption reached 4.8 Mm^3 / day, which would represent around 3 times the consumption of the residential market. The price range found for penetration to be possible was 158 to 299 dollars per ton depending on the discount rate.

Sumário

Lista de Figuras **xii**

Lista de Tabelas **xiv**

1 Introdução **1**

1.1 Contexto e Relevância do Tema 1

1.2 Objetivos e estrutura 2

1.2.1 Objetivo Geral 2

1.2.2 Objetivos específicos 2

1.2.3 Estrutura da Dissertação 2

2 Cabotagem no Brasil **3**

2.1 Transporte de Cargas no Brasil 3

2.2 Cabotagem no Brasil 4

2.2.1 Transporte de Cargas 4

2.2.2 Granel Líquido e Gasoso 4

2.2.3 Granel Sólido 5

2.2.4 Carga Conteinerizada 6

2.2.5 Carga Geral 6

2.2.6 Carga Total 7

2.3 Frota 8

2.3.1 Petroleiros 9

2.3.2 Graneleiros 10

2.3.3 Porta Contêineres 12

2.4 Principais Portos 13

2.5 Combustíveis Marítimos 14

2.5.1 Bunker Marítimo 14

2.5.2 Gás Natural Liquefeito 15

2.6 Mercado de Gás no Brasil 23

3 Metodologia **25**
3.1 Comércio entre os Portos de Petroleiros e Graneleiros 26
3.1.1 Mapeamento e seleção das rotas 26
3.1.2 Definição da categoria de navio por rota 27
3.1.3 Definição das Velocidades 28
3.2 Comércio entre os Portos de Porta Contêineres 29
3.2.1 Mapeamento e seleção das rotas 29
3.2.2 Número de viagens entre os Clusters 31
3.2.3 Definição das Velocidades dos Porta Contêineres 32
3.3 Caracterização dos navios 32
3.3.1 Principais dimensões de um navio 33
3.3.2 Levantamento das dimensões lineares e do peso leve como função do porte 34
3.4 Hipóteses de distinção das Viagens 35
3.4.1 Petroleiros e Graneleiros 35
3.4.2 Viagem de volta (*ballast voyage*) 36
3.4.3 Porta Contêineres 36
3.5 Resistência ao avanço e propulsão 36
3.5.1 Resistência ao avanço 37
3.6 Consumo de Combustível 39
3.6.1 Motores Principais 40
3.6.2 Motores Auxiliares 40
3.6.3 Caldeiras 40
3.6.4 Tempos no porto 41
3.7 Cenários de entrada de GNL 42
3.7.1 Projeção para 2030 42
3.7.2 Cenário Limite Superior 43
3.7.3 Cenário Limite Inferior 45
3.7.4 Cenário Superior de Gás Natural 46
3.7.5 Cenário Inferior de Gás Natural 47
3.7.6 Resumo dos Cenários 48
3.8 Custos das estratégia de GNL e de Bunker 50
3.8.1 Preços dos Combustíveis 50
3.8.2 Infraestrutura de *bunkering* 51
3.8.3 Preços dos navios novos e Retrofit 52
3.8.4 Evolução do número total de navios 53
3.8.5 Equações para os custos 54

4 Resultados e Discussões **56**
4.1 Consumo Histórico de Bunker . . . 56
4.1.1 Consumo Petroleiros . . . 56
4.1.2 Consumo Graneleiros . . . 57
4.1.3 Consumo Porta-Contêineres . . . 58
4.1.4 Consumo Cabotagem Total . . . 58
4.2 Projeção para 2030 . . . 59
4.2.1 Cenário Limite Superior . . . 59
4.2.2 Cenário Limite Inferior . . . 60
4.2.3 Resumo Cenários Superior e Inferior . . . 61
4.2.4 Gás Natural Superior . . . 61
4.2.5 Gás Natural Inferior . . . 62
4.2.6 Comparação dos Cenários . . . 63
4.3 Custos . . . 64
4.3.1 Estratégia Bunker . . . 64
4.3.2 Estratégia GNL . . . 66
4.3.3 Preço do GNL para cada taxa de desconto . . . 69
4.4 Estratégias para expensão do GNL . . . 70

5 Considerações Finais **73**
5.1 Principais Conclusões . . . 73
5.2 Abrangência e utilidade . . . 75
5.3 Limitações de metodologia . . . 75
5.4 Sugestões para trabalhos futuros . . . 77

Referências Bibliográficas **78**

A Rotas **84**
A.1 Petroleiros . . . 84
A.2 Graneleiros . . . 84
A.3 Porta Contêiners . . . 84

B Equações de Regressão Linear dos Navios **85**
B.1 Petroleiros . . . 85
B.2 Graneleiros . . . 87
B.3 Porta-Conteiner . . . 88

C Eficiências **90**
C.1 Eficiência de casco . . . 90
C.2 Eficiência da hélice . . . 90
C.3 Eficiência Rotativa . . . 90

C.4 Eficiência de Transmissão ou de Eixo 90

D Código em Python **91**

Lista de Figuras

2.1 Matriz de Transporte no Brasil em 2018 4
2.2 Evolução da carga de granel líquido e gasoso entre 2010 e 2018 5
2.3 Evolução da carga de granel sólido entre 2010 e 2018 5
2.4 Evolução da carga conteinerizada entre 2010 e 2018 6
2.5 Evolução da carga geral entre 2010 e 2018 7
2.6 Evolução da carga entre 2010 e 2018 7
2.7 Embarcações por classe 8
2.8 Soma do porte bruto por classe 9
2.9 Evolução das cargas por tipo de porto 13
2.10 Portos 14
2.11 Terminais de GNL no Brasil 16
2.12 Rotas GNL 18
2.13 Opçoes de Bunkering 20
2.14 LNG pump 22
2.15 PBU 22
2.16 Compressor 23
2.17 Demanda de gás natural por segmento no Brasil 23
2.18 Oferta de gás natural no Brasil 24

3.1 Fluxograma do procedimento metodológico 26
3.2 Clusters Segundo a ILOS 30
3.3 Cluster Viagens 31
3.4 Principais dimensões dos navios 34
3.5 Viagem de Petroleiros e Graneleiros 36
3.6 Viagem de Porta Contêiner 36
3.7 Cenário alta GNL share de combustíveis 47
3.8 Cenário de baixa GNL share de combustíveis para petroleiros 47
3.9 Cenário de baixa GNL share de combustíveis para porta contêineres . 49
3.10 Cenários 49
3.11 Preços Santos VLSFO e Brent 50

4.1 Consumo dos petroleiros entre 2011-2018 57
4.2 Consumo dos graneleiros entre 2011-2018 57
4.3 Consumo dos porta-contêineres entre 2011-2018 58
4.4 Consumo na cabotagem entre 2011-2018 59
4.5 Projeção para o consumo de combustível em 2030 para o cenário Limite Superior 59
4.6 Projeção para o consumo de combustível em 2030 para o cenário Limite Inferior 60
4.7 Resumo dos Cenários Superior e Inferior 61
4.8 Projeção LSS do gás natural 62
4.9 Projeção LII do gás natural 62
4.10 Comparação dos cenário de penetração do gás natural milhões de m^3/dia 63
4.11 Preço do GNL conforme a taxa de desconto 69
4.12 Preço observado do GNL e preços calculados para cada taxa de desconto 70

Lista de Tabelas

2.1 Categoria por porte 10
2.2 Distribuição dos petroleiros na cabotagem brasileira segundo o porte . 10
2.3 Distribuição dos petroleiros na cabotagem brasileira segundo o ano de entrada 10
2.4 Distribuição dos graneleiros na cabotagem brasileira segundo o porte 11
2.5 Distribuição dos graneleiros na cabotagem brasileira segundo o ano de entrada 11
2.6 Categoria por porte 12
2.7 Categoria por porte 12
2.8 Distribuição dos porta contêineres na cabotagem segundo o ano de entrada 13
2.9 Propriedades do GNL 15
2.10 Terminais de Regasificação no Brasil 17
2.11 Preço GN e Santos VLSFO 17

3.1 Rotas Graneleiros em 2018 27
3.2 Categoria por porte de petroleiros e graneleiros 28
3.3 Rotas Graneleiros e Navios Característicos em 2018 28
3.4 Velocidade de projeto de Petroleiros 29
3.5 Velocidade de projeto de Graneleiros 29
3.6 Movimentação Portuária 30
3.7 Viagens dos navios porta contêineres entre os clusters em 2018 32
3.8 Velocidade dos navios porta contêineres entre os clusters 32
3.9 Dimensões graneleiros de 2018 35
3.10 Coeficiente de Resistência do Ar para Petroleiros e Graneleiros 37
3.11 Potência requerida dos motores auxiliares 41
3.12 Potência Requerida das caldeiras 42
3.13 Tempos médio nos portos em horas 42
3.14 Regressão Linear Petroleiros 43
3.15 Regressão Linear Graneleiros 44
3.16 Regressão Linear Porta Contêineres 45

3.17 Carga Granel Líquido e Gasoso 45
3.18 Carga Granel Sólido 46
3.19 Carga Conteinerizada 46
3.20 Rotas Petroleiros Possíveis de Entrada de GNL 48
3.21 Rotas Petroleiros Possíveis de Entrada de GNL 48
3.22 Preço Brent e Santos VLSFO 51
3.23 Preço Infraestrutura de *bunkering* 51
3.24 Preço Retrofit e navios novos em dólares de 2012 52
3.25 Preço Retrofit e navios novos em dólares de 2018 53
3.26 Entrada de Navios e Retrofit para petroleiros 54
3.27 Entrada de Navios e Retrofit para Graneleiros 54
3.28 Entrada de Navios e Retrofit para Porta Contêineres 55

4.1 Custo dos Combustíveis da estratégia Bunker em MUS$$_{2018}$ 64
4.2 Custo dos Navios Novos (CAPEX) em MUS$$_{2018}$ 65
4.3 Custos Anuais em MUS$$_{2018}$ 65
4.4 VPL em MUS$$_{2018}$ conforme a taxa de desconto (% ao ano) 66
4.5 Custo dos Combustíveis em MUS$$_{2018}$ 66
4.6 Custo dos Navios Novos GNL (CAPEX) em MUS$$_{2018}$ 67
4.7 Custo do Retrofit para GNL MUS$$_{2018}$ 67
4.8 CAPEX do *bunkering* conforme a taxa de desconto em MUS$$_{2018}$ . . 68
4.9 OPEX do Bunkering em MUS$$_{2018}$ 68
4.10 Preço do GNL conforme a taxa de desconto 69

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto e Relevância do Tema

Apesar da extensão do litoral brasileiro, a cabotagem ainda não é utilizada em seu potencial, mesmo sendo considerada o meio de transporte de carga com menor custo de frente e maior eficiência em relação à emissões de gases de efeito estufa [1]. Atualmente, cerca de 9% da carga transportada em relação ao peso é transportada via cabotagem [2].

Nos últimos anos, o gás natural liquefeito (GNL) tem sido cada vez mais utilizado como combustível marítimo. Em 2019 foram encomendados 184 navios a GNL, praticamente dobrando a frota [3]. Isso se deve, principalmente, a nova regulação vigente da Organização Marítima Internacional (OMI ou em inglês *IMO*), que introduziu limites de emissões de enxofre para no máximo 0,5% em 2020. O limite de enxofre no óleo combustível usado a bordo de navios que operam fora das áreas de controle de emissões designadas é reduzido para 0,50% em base mássica. Isso reduzirá significativamente a quantidade de óxidos de enxofre emitidos pelos navios e deve trazer grandes benefícios à saúde e ao meio ambiente para o mundo, principalmente para populações que vivem perto de portos e costas [4]. .

O mercado do GNL ainda é incipiente no Brasil, já que o país possui 4 terminais de regaseificação de GNL, sendo o último inaugurado em Dezembro de 2019 em Aracaju, porém não há nenhum terminal de liquefação no país. Enquanto isso, a produção de gás natural vem aumentando a cada ano, saltando de 30 bilhões de m^3 em 2006 para 65 bilhões de m^3 em 2018 [5], porém a oferta nacional não cresceu da mesma maneira, sendo necessária a reinjeção do gás natural.

1.2 Objetivos e estrutura

1.2.1 Objetivo Geral

Diante da discussão sobre novos combustíveis marítimos e considerando uma ausência até então de um estudo voltado para o GNL na cabotagem no Brasil, estudam-se neste trabalho diferentes cenários de penetração de GNL na cabotagem e seus possíveis custos.

Neste sentido, o objetivo geral desta dissertação é verificar o potencial mercado de gás natural como combustível marítimo para o transporte de cargas via cabotagem no Brasil, visando encorajar políticas para a implementação do mesmo.

1.2.2 Objetivos específicos

Para chegar no objetivo geral descrito na Subseção 1.2.1, será necessário passar por outros objetivos específicos. Eis, então, os objetivos específicos do trabalho:

- desenvolvimento de uma metodologia para estimar o consumo de combustível entre 2011 e 2018 na cabotagem brasileira para 3 diferentes classes de navios;
- desenvolvimento de uma metodologia para a projeção de consumo de combustível para o ano de 2030;
- cenarização da penetração de GNL como combustível marítimo;
- Desenvolvimento de uma metodologia para comparar duas estratégias de motorização.

1.2.3 Estrutura da Dissertação

Este trabalho está estrutura da seguinte maneira: No Capítulo 2, apresenta o contexto do problema, discutindo a importância da cabotagem, os combustíveis utilizados e a possível adoção de GNL associada a um mercado cativo de gás natural. Em seguida, no Capítulo 3 é proposta a metodologia para o consumo de combustíveis marítimos na cabotagem e a cenarização para projeções de penetração de GNL, assim como os custos associados. No Capítulo 4, discutem-se os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia e, no Capítulo 5, tecem-se alguns comentários finais.

Capítulo 2

Cabotagem no Brasil

A cabotagem no Brasil, mesmo sendo relatada como o modal mais competitivo e menos poluente, ainda não é explorada em sua máxima capacidade. Apesar da extensão do litoral brasileiro, aproximadamente de 7400 km, a cabotagem representa apenas 9% da carga transportada em toneladas [6].

Neste capítulo, discute-se o papel atual da cabotagem no Brasil, assim como a frota, combustíveis marítimos, o papel crescente do gás natural liquefeito, a motorização, aspectos regulatórios e o mercado de gás natural no Brasil.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: a Seção 2.1 informa sobre o atual estágio da cabotagem no Brasil referente ao seu percentual de participação na matriz de transporte brasileira. A Seção 2.2, Seção 2.3 e Seção 2.4 mostra dados do transporte de cargas, frota e portos no Brasil. A partir da Seção 2.5 discuti-se sobre combustíveis marítimos e suas principais características. A **??** relata os aspectos regulatórios no Brasil e, por último, a Seção 2.6 relata o atual mercado de gás no Brasil.

2.1 Transporte de Cargas no Brasil

A Matriz de Transporte brasileira, conforme a Figura 2.1, ainda é dependente do modal rodoviário com participação de 58% no transporte das carga no Brasil em toneladas. O transporte aquaviário, que é o conjunto da cabotagem e da navegação interior, representa apenas 9,3% da carga transportada em toneladas no Brasil [2]. A cabotagem é o modal com menor emissão de gases de efeito estufa por toneladas por quilômetros útil (TKU). Comparando os modais, a cabotagem emite 20,0 gramas de CO_2 por TKU, contra 23,3 do modal ferroviário e 101,2 do modal rodoviário [6].

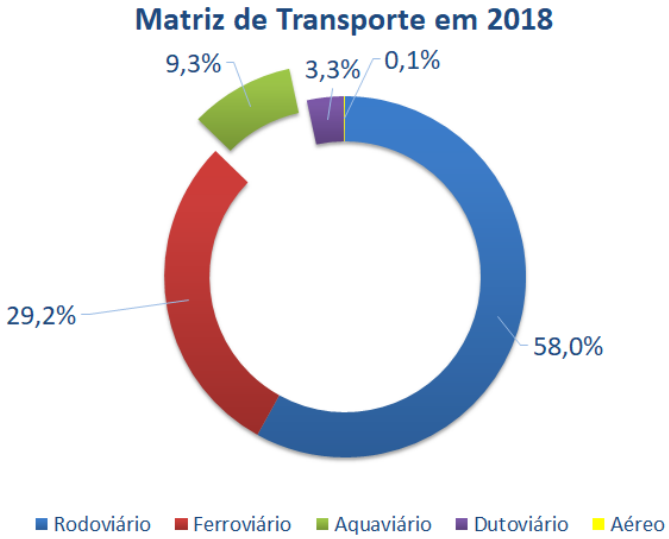

Figura 2.1: Matriz de Transporte no Brasil em 2018
Fonte: Elaboração Própria com dados de [2]

2.2 Cabotagem no Brasil

2.2.1 Transporte de Cargas

A caracterização do transporte de cargas no Brasil, deu-se conforme a caracterização feita pela a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) com a definição de 4 grupos de produtos: Granel Sólido (Minérios, escórias e cinzas principalmente), Granel Líquido (Combustíveis minerais, óleos minerais e produtos da sua destilação), Carga Conteinerizada e Carga Geral. No período entre 2010 e 2018, os graneis líquidos se destacam como principal produto transportado via cabotagem, seguido pelo granel sólido, carga conteinerizada e carga geral [7].

2.2.2 Granel Líquido e Gasoso

São as mercadorias fluídas e estão, em sua maioria, associadas a produtos químicos como o petróleo, etanol e gasolina. Em outros casos, também se tem o suco de laranja e óleos vegetais.

A Figura 2.2 apresenta a evolução da carga de granel líquido e gasoso no período entre 2010 e 2018. Em 2010 a carga transportada foi de 99.865.419 toneladas e em 2018 de 122.261.056 toneladas. Entre as cargas, destacam-se combustíveis minerais, óleos minerais e produtos da sua destilação com cerca de 98% da tonelagem transportada. Os 2% restantes estão distribuídos entre outras 9 classes de produtos [7].

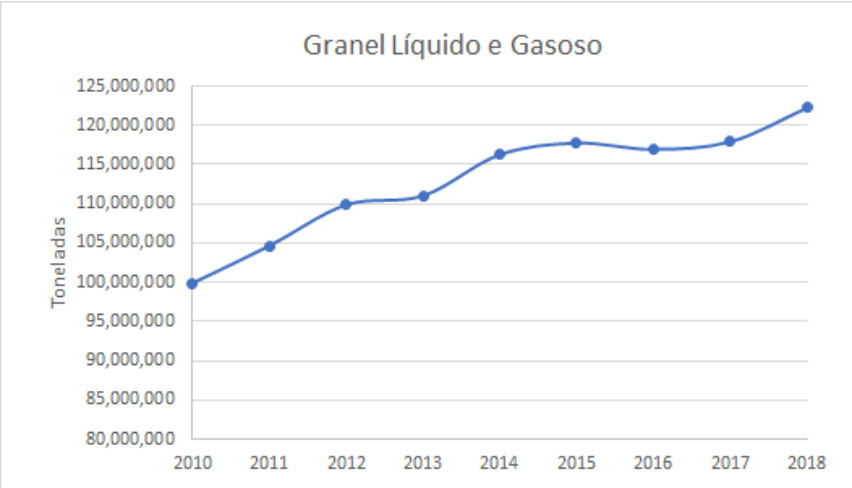

Figura 2.2: Evolução da carga de granel líquido e gasoso entre 2010 e 2018
Fonte: Elaboração Própria com dados de [7]

2.2.3 Granel Sólido

Os granéis sólidos referem-se aos produtos de natureza sólida (ainda que em partículas relativamente pequenas), também identificados como matérias-primas, que podem ser contados por kg. Os principais granéis sólidos agrícolas transportados no Brasil são a soja, farelo de soja e o milho. São muito expressivos também o feijão, o trigo, o café, o sal e outros cereais. Existem ainda os produtos minerais que também se enquadram nesta categoria: bauxita; enxofre; manganês e minério de ferro. A Figura 2.3 mostra a evolução de carga transportada de granel sólido entre 2010 e 2018. Em 2018 o total transportado em toneladas foi de 20.425.585. O principal produto desta categoria foi o grupo "Minérios, escórias e cinzas", representando 91,2% to total transportado. Do restante, se destaca o grupo "Sal, enxofre, terra e pedras, gesso, cal e cimento"com cerca de 6% do total [7].

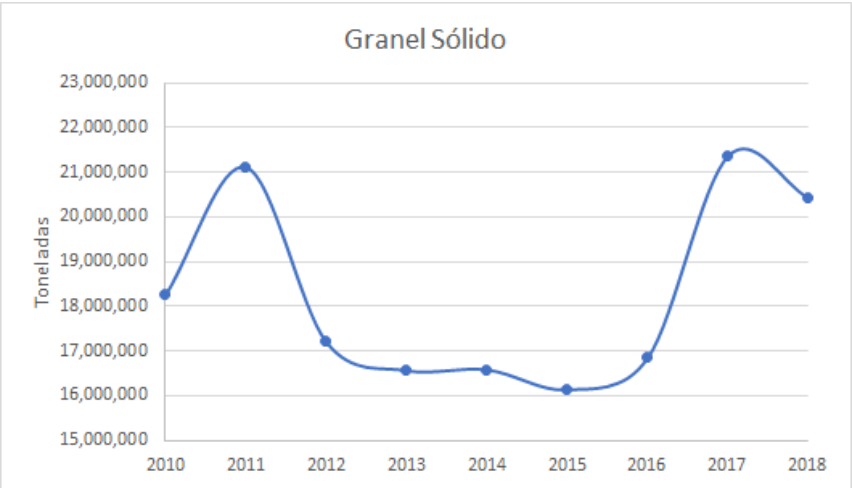

Figura 2.3: Evolução da carga de granel sólido entre 2010 e 2018
Fonte: Elaboração Própria com dados de [7]

2.2.4 Carga Conteinerizada

A conteinerização é um sistema de transporte de mercadoria usando contêineres. Os contêineres têm dimensões padronizadas[1]. Eles podem ser carregados e descarregados, empilhados, transportados com eficiência por longas distâncias e transferidos de um modo de transporte para outro - navios porta-contêineres, vagões de transporte ferroviário e caminhões semi-reboques - sem serem abertos. O sistema de manuseio é completamente mecanizado, de forma que todo o manuseio é feito com guindastes e empilhadeiras especiais. Todos os contêineres são numerados e rastreados usando sistemas computadorizados [8].

A Figura 2.4 ilustra a carga conteinerizada entre 2010 e 2018. Entre as classes apresentadas, essa modalidade foi a que teve maior crescimento percentual, saltando de 5.183.683 em 2010 para 13.551.791 toneladas em 2018.

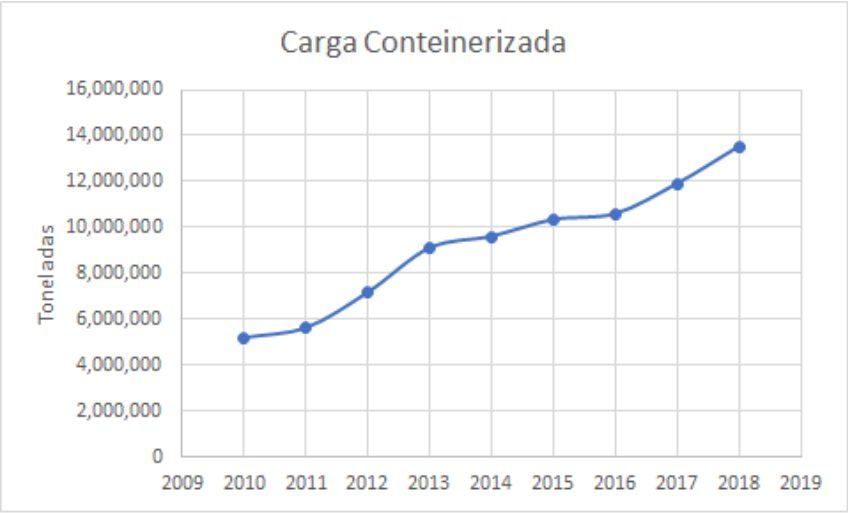

Figura 2.4: Evolução da carga conteinerizada entre 2010 e 2018
Fonte: Elaboração Própria com dados de [7]

2.2.5 Carga Geral

No transporte marítimo, carga a granel ou carga geral são mercadorias que devem ser carregadas individualmente, e não em contêineres intermodais nem a granel como com óleo ou grãos. Os navios que transportam esse tipo de carga são chamados de navios de carga geral. O termo quebra a granel deriva da frase quebra a granel - a extração de uma parte da carga de um navio ou o início do processo de descarregamento dos porões do navio. Esses produtos podem não estar em contêineres. A carga a granel é transportada em sacos, caixas, engradados, tambores ou barris.

Esse grupo de produtos é o mais amplo de todos os citados neste trabalho. Ele

[1] 6,1m de comprimento, 2,4m de largura e 2,6m de altura, com um volume de 39 m^3

inlui desde ferro fundido a automóveis e tratores. A Figura 2.5 mostra a evolução desse tipo de carga entre 2010 e 2018.

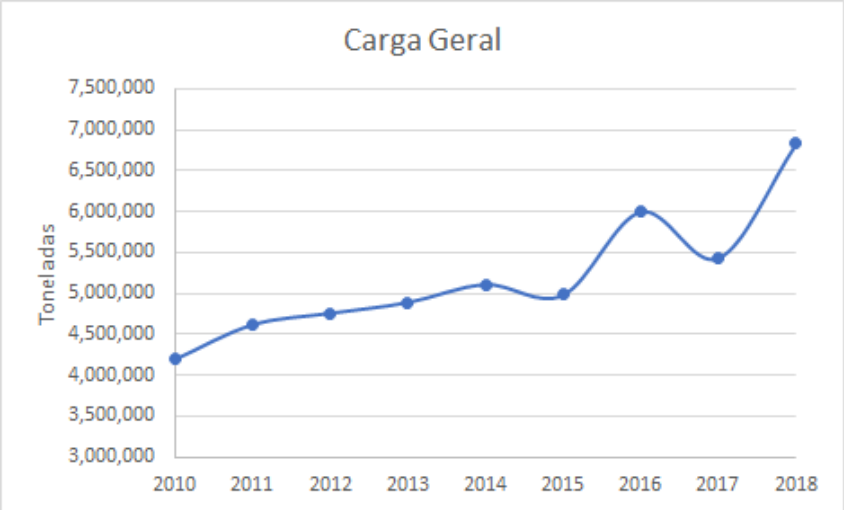

Figura 2.5: Evolução da carga geral entre 2010 e 2018
Fonte: Elaboração Própria com dados de [7]

2.2.6 Carga Total

A carga total é sumarizada na Figura 2.6 abaixo. Nota-se a grande importância do granel líquido e gasoso no total do transporte de carga via cabotagem no Brasil. Já a carga geral é a que possuir a menor porcentagem de participação no total e por este motivo não foi considerada nesse atual trabalho.

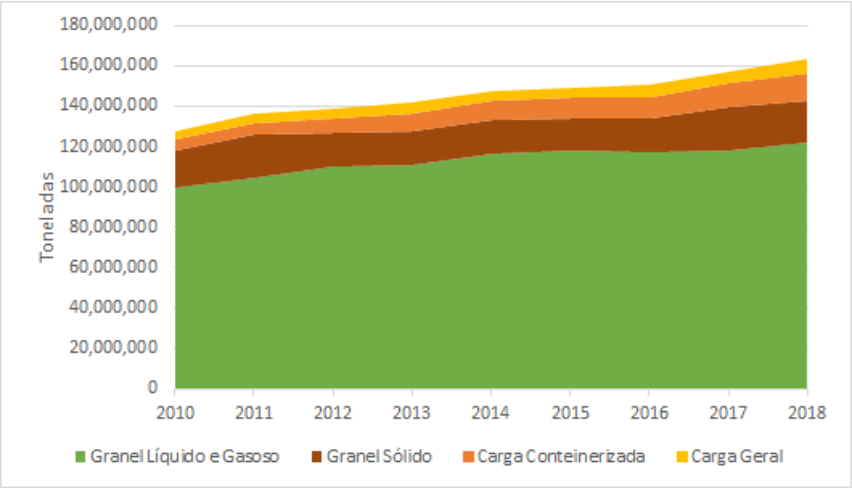

Figura 2.6: Evolução da carga entre 2010 e 2018
Fonte: Elaboração Própria com dados de [7]

2.3 Frota

A capacidade somada de todas as embarcações é de 4.648.230,53 toneladas. Ao todo existem 378 embarcações entre Petroleiros, Balsas, Barcaça, bote, cábrea, carga geral, catamarã, chata, flutuante, gases liquefeitos, graneleiros, pesqueiros, porta contêineres, supridores de plataformas, rebocadores, químicos e lanchas segundo dados da ANTAQ. Apesar do alto número de embarcações no total, destacam-se os petroleiros com 2.273.408 de toneladas de capacidade (35 embarcações), os porta contêineres (17 embarcações), com 750.859 toneladas de capacidade, os graneleiros (9 embarcações), com 546.505 toneladas de capacidade em toneladas por porte bruto. Para demostrar esses dados, as duas figuras abaixo mostram a quantidade de navio e a capacidade de carga por classe. A Figura 2.7 mostra graficamente a distribuição das embarcações por classe. Em relação a capacidade, é possível perceber a maior importância dos petroleiros no cenário da cabotagem. A Figura 2.8 mostra a soma do porte bruto em toneladas de cada classe [9].

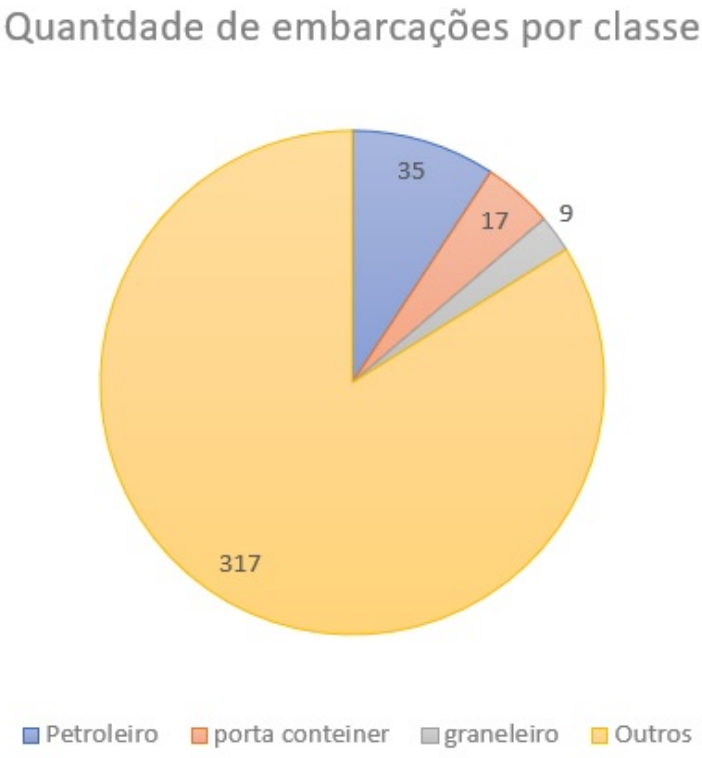

Figura 2.7: Embarcações por classe
Fonte: Autor com dados de [9]

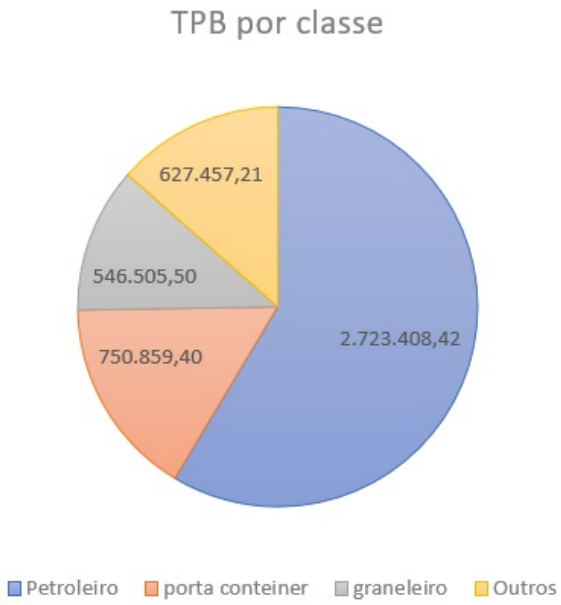

Figura 2.8: Soma do porte bruto por classe
Fonte: Elaboração Própria com dados de [9]

2.3.1 Petroleiros

Os navios petroleiros ou navios-tanque são aqueles projetados para o transporte de cargas líquidas a granel [10]. Um navio petroleiro é um navio projetado para o transporte a granel de petróleo ou de seus produtos. Existem dois tipos básicos de petroleiros: petroleiros de óleo cru e petroleiros de produtos refinados. Os petroleiros transportam grandes quantidades de petróleo bruto não refinado do seu ponto de extração para as refinarias. Por exemplo, movem o petróleo bruto de poços de petróleo em um país produtor para refinarias em outro país. Os navios-tanque de produtos, geralmente muito menores, são projetados para mover produtos refinados das refinarias para pontos próximos aos mercados consumidores. Por exemplo, incluem a transferência de gasolina das refinarias na Europa para os mercados consumidores na Nigéria e em outros países da África Ocidental. Os petroleiros podem ser classificados pelo seu porte. A Tabela 2.1 mostra como é esta classificação.

Conforme a classificação da Tabela 2.1 os petroleiros na cabotagem estão distribuídos conforme a Tabela 2.2. Em relação a idade dos petroleiros, a distribuição é a seguinte conforme a Tabela 2.3

Tabela 2.1: Categoria por porte

Categoria Porte (tpb)	
Pequenos petroleiros	até 10 000
Handysize	10 000 - 30 000
Handymax	30 000 - 55 000
Panamax	60 000 - 75 000
Aframax	80 000 - 120 000
Suezmax	125 000 - 170 000
VLCC	250 000 - 320 000
ULCC	acima de 350 000

Fonte: Elaboração Própria com dados de [11]

Tabela 2.2: Distribuição dos petroleiros na cabotagem brasileira segundo o porte

Categoria Porte (tpb)	de	até	Quantidade
Pequenos petroleiros	0	10 000	1
Handysize	10 000	30 000	10
Handymax	30 000	55 000	8
Panamax	60 000	75 000	2
Aframax	80 000	120 000	4
Suezmax	125 000	170 000	10
VLCC	250 000	320 000	0
ULCC	350 000		0

Fonte: Elaboração Própria com dados de [9]

Tabela 2.3: Distribuição dos petroleiros na cabotagem brasileira segundo o ano de entrada

de	até	Quantidade
1975	1979	1
1980	1984	7
1985	1989	2
1990	1994	0
1995	1999	2
2000	2004	0
2005	2009	3
2010	2014	8
2015	2019	12

Fonte: Elaboração Própria com dados de [9]

2.3.2 Graneleiros

Um graneleiros é um navio mercante especialmente projetado para transportar cargas a granel não embaladas, como grãos, carvão, minério e cimento, em seus

porões de carga. Os graneleiros possuem a mesma classificação por porte do que os petroleiros [12][11]. A Tabela 2.4 mostra a distribuição de graneleiros na cabotagem brasileira conforme o porte. Em relação a data de entrada dos navios, a distribuição é a seguinte conforme a Tabela 2.5

Tabela 2.4: Distribuição dos graneleiros na cabotagem brasileira segundo o porte

Categoria Porte (tpb)	de	até	Quantidade
Pequenos graneleiros	0	10 000	0
Handysize	10 000	35 000	2
Handymax	35 000	55 000	2
Panamax	55 000	80 000	2
Capesize	80 000	200 000	3
Large Capesize	200 000	300 000	0
VLBC	300 000		0

Fonte: Elaboração Própria com dados de [9]

Tabela 2.5: Distribuição dos graneleiros na cabotagem brasileira segundo o ano de entrada

de	até	Quantidade
1980	1984	1
1985	1989	0
1990	1994	0
1995	1999	2
2000	2004	0
2005	2009	0
2010	2014	5
2015	2019	1

Fonte: Elaboração Própria com dados de [9]

2.3.3 Porta Contêineres

Navios porta-contêineres são os navios de carga que transportam a maioria das cargas não-marítimas. No mundo de hoje, os navios contêineres transportam cerca de 90% das cargas não graneleiras do mundo. Uma das principais maneiras de transportar mercadorias prontas em todo o mundo é através de navios de contêineres. Esses contêineres são de tamanho padronizado, para que possam ser facilmente transferidos para vários modos de transporte.

Os porta contêineres possuem uma classificação que difere dos graneleiros e petroleiros. Normalmente, o seu porte é medido em Unidade Equivalente à 20 pés (ou do inglês *Twenty-foot equivalent unit, TEU*)[2]. A classificação é mostrada na Tabela 2.6.

Tabela 2.6: Categoria por porte

Categoria Porte (TEU)	
Pequenos porta contêineres	até 1 000
Feeder	1 000 - 2 800
Panamax	2 800 - 5 100
Post-Panamax	5 100 - 10 000
New-Panamax	10 000 - 14 500
ULCV	acima de 14 500

Fonte: Elaboração Própria com dados de [11]

Segundo a classificação da Tabela 2.6, os porta contêineres estão distribuídos conforme a Tabela 2.7

Tabela 2.7: Categoria por porte

Categoria Porte (TEU)		Quantidade
Pequenos porta contêineres	até 1 000	0
Feeder	1 000 - 2 800	9
Panamax	2 800 - 5 100	8
Post-Panamax	5 100 - 10 000	0
New-Panamax	10 000 - 14 500	0
ULCV	acima de 14 500	0

Fonte: Elaboração Própria com dados de [13]

[2]Um TEU representa a capacidade de carga de um contêiner marítimo normal, de 20 pés de comprimento, por 8 de largura e 8 de altura. A altura de um TEU pode variar de uma baixa de 4,25 pés (1,30 m) para os mais comuns 8,5 pés (2,6 m) a 9,5 pés (2,9 m).

Tabela 2.8: Distribuição dos porta contêineres na cabotagem segundo o ano de entrada

de	até	Quantidade
1995	1999	0
2000	2004	1
2005	2009	7
2010	2014	7
2015	2019	2

Fonte: Elaboração Própria com dados de [9]

2.4 Principais Portos

Os portos privados, em 2018, foram responsáveis pela movimentação de 79% da carga contra 21% dos portos públicos. A Figura 2.9 mostra a evolução da carga por tipo de porto entre 2010 e 2018. Como pode ser visualizado, os portos privados, desde 2010, movimentam mais cargas que os portos públicos. A Figura 2.10 mostra os portos que operam no Brasil. Em azul estão sinalizados os portos públicos e, em vermelho, os portos privados.

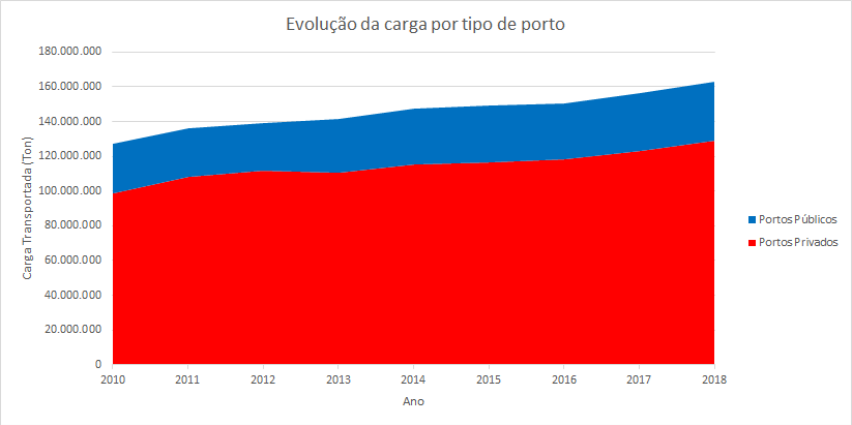

Figura 2.9: Evolução das cargas por tipo de porto
Fonte:[7]

Em relação à distribuição espacial, percebe-se que o Brasil possui portos em grande parte da sua costa sendo privados ou públicos. Existe a possibilidade de transportar cargas via cabotagem desde Manaus até o extremo sul do país. A Figura 2.10 mostra a distribuição do portos.

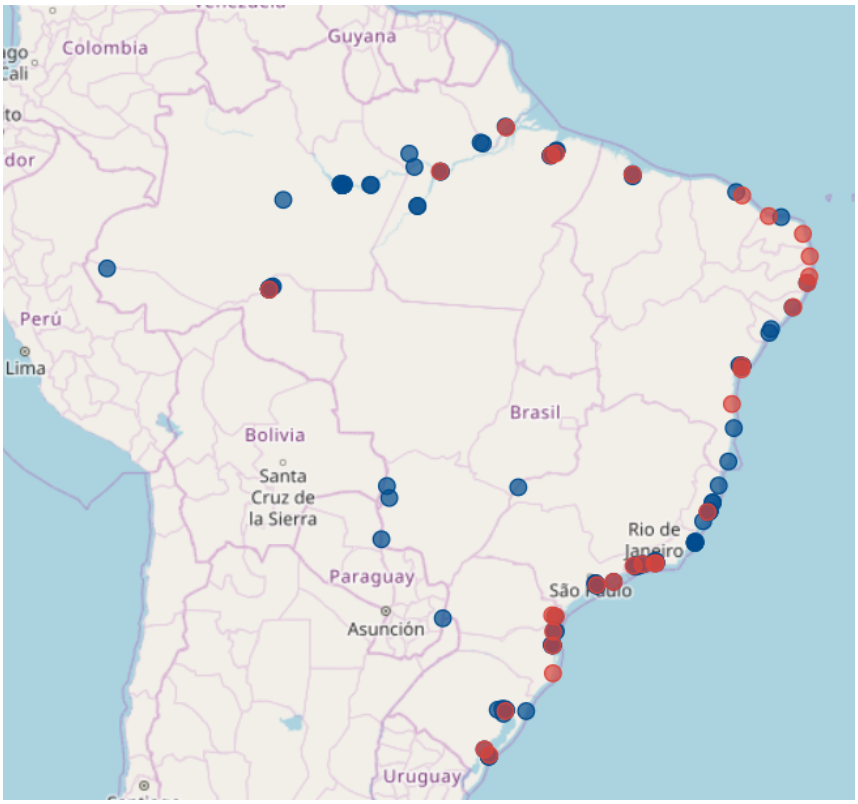

Figura 2.10: Portos
Fonte:[7]

2.5 Combustíveis Marítimos

2.5.1 Bunker Marítimo

Os combustíveis marítimos podem ser classificados em duas categorias: os óleos combustíveis, ou bunker, e os óleos diluentes, ou diesel marítimo. O bunker é produzido por resíduos da destilação, enquanto o diesel marítimo (ou MGO do inglês maritime gas oil) é produzido por frações mais leves do processo de refino. O bunker é utilizado nos motores principais, de propulsão, já o diesel marítimo em sistemas auxiliares e de emergência [14].

O MGO descreve combustíveis marítimos que consistem exclusivamente em destilados. O MGO é usado em unidades auxiliares de média a alta rotação ou em motores auxiliares. O MDO descreve combustíveis marinhos que são compostos de várias misturas de destilados (também chamados de gasóleo marinho) e óleo combustível pesado. Os óleos combustíveis pesados são usados principalmente como combustível marítimo, e o HFO é o combustível marítimo mais utilizado atualmente; praticamente todos os motores diesel marítimos de média e baixa rotação são projetados para óleo combustível pesado. O óleo combustível pesado é um combustível residual incorrido durante a destilação do petróleo bruto. A qualidade do combustível residual depende da qualidade do petróleo bruto usado na refinaria. Para atingir

várias especificações e níveis de qualidade, esses combustíveis residuais são misturados com combustíveis mais leves, como o gasóleo marítimo ou o óleo diesel marítimo. As misturas resultantes também são chamadas de óleos combustíveis intermediários (IFO) ou óleo diesel marítimo [15].

2.5.2 Gás Natural Liquefeito

O gás natural liquefeito (GNL) é a principal forma de transporte e armazenamento do gás natural quando GN é resfriado a temperatura de -162 °C. No estado líquido, o GNL possui 1/630 do volume do gás natural [16].

Após uma análise de disponibilidade do óleo combustível com baixo teor de enxofre, a Organização Marítima Internacional (OMI ou IMO em inglês) estabeleceu limite de emissão de enxofre em 0,50% a partir de 2020. A partir desse momento, vários estudos e empresas começaram a se mobilizar por soluções, entre elas: utilizar bunker de baixo teor de enxofre, instalação de scrubbers ou utilização de GNL. Apesar de ser um marco regulatório para o comércio internacional, consequências podem ocorrer a nível nacional, como o desenvolvimento de uma cadeia produtiva de GNL.

O principal argumento da escolha do GNL é a redução significativa na poluição local. O uso de GNL praticamente remove emissões de SOx e material particulado (MP) e reduz a emissão de NOx em 85%. Além disso, o GNL pode reduzir emissões de gases de efeito estufa entre 10 a 20% dependendo da tecnologia de propulsão [17].

Principais Características

As principais característica do GNL podem ser resumidas conforme a Tabela 2.9. Nota-se a principal vantagem da liquefação ao comparar a densidade do líquido e o gás. Enquanto o gás possui uma densidade de 0,565 kg/m^3, o líquido possui de 426 kg/m^3 [18].

Tabela 2.9: Propriedades do GNL

Propriedades	
Massa Molar	16g
Ponto de autoignição	595 °C
Ponto de ebulição	-162 °C
Ponto de fulgor	-187 °C
Densidade (gás)	0,656 kg / m^3
Densidade (líquido: -162 °C e 1 atm)	426 kg / m^3
Poder calorífico inferior em base mássica	55,2 MJ / kg
Poder calorífico inferior em base volumétrica (líquido: -162 °C e 1 atm)	23,6 MJ / m^3

Fonte: Elaboração Própria com dados de [19]

Infraestrutura

Atualmente, o Brasil possui 3 terminais de regaseificação e armazenamento de GNL (Rio de Janeiro, Suape e Pecém). Até agosto de 2019 existiam 2 projetos previstos e outros 15 projetos em fase de estudos [20]. Esses projetos são impetantes maneiras de flexibilização da oferta de gás natural no país. A Figura 2.11 mostra a distribuição dos projetos de GNL no território brasileiro. Apesar dos terminais, não existe nenhum projeto de liquefação de gás natural no Brasil atualmente.

Figura 2.11: Terminais de GNL no Brasil
Fonte:[20]

A Tabela 2.10 mostra os projetos existentes e qual seria a capacidade de cada um.

Tabela 2.10: Terminais de Regasificação no Brasil

Projeto	Status	Mm^3/dia
São Francisco do Sul/SC	Projeto	15
Paranaguá/PR	Projeto	14
Rio Grande/RS	Não Justificável	-
São José do Norte/RS	Não Justificável	-
Tramandaí/RS	Não Justificável	-
Imbituba/SC	Não Justificável	-
Santos/SP	Projeto	14
Macaé/RJ	Em construção	21
São João da Barra/RJ	Em construção	21
Presidente Kennedy/ES	Projeto	20
Barra do Riacho/ES	Projeto	Não Definido
Barra dos Coqueiros/SE	Terminado	21
São Luís/MA	Projeto	21
Barcarena/PA	Projeto	Não Definido
Itacoatiara (AM)	Projeto	Não Definido

Fonte: Elaboração Própria com dados de [20]

Preço do GNL

O preço mais baixo relativo do gás natural em relação aos combustíveis marítimos é um importante fator para o uso do GNL na navegação.

A Tabela 2.11 compara o preço médio do ano 2018 do combustível VLSFO vendido em Santos com o preço do gás natural doméstico e o GNL importado.

Tabela 2.11: Preço GN e Santos VLSFO

Combustível	IFO380	GN doméstico	GNL importado
Média \$/t	670[21]	200[22]	415 [22]

Fonte: Elaboração Própria

Todavia, a comparação de preço entre bunker e GNL deve ser feita no custo para abastecer os navios (*bunkering*). Existem algumas variáveis que devem ser introduzidas para estimar o preço do GNL. O preço de poço é o preço da produção de gás natural e todas as margens de transporte, processo, armazenamento e *bunkering* devem ser incluídos. Existem duas cadeias possíveis para estimar o preço de GNL no Brasil visando abastecer o transporte marítimo de cabotagem. A primeira é a e importação do GNL e toda a infraestrutura associada ao abastecimento. A segunda cadeia é a produção local mais a liquefação e a estrutura de abastecimento. Visto que não existem plantas de liquefação no Brasil assumiu-se que o custo de oportunidade para segunda cadeia seria o limite do preço do GNL importado. A

Figura 2.12 mostra essas duas possibilidades:

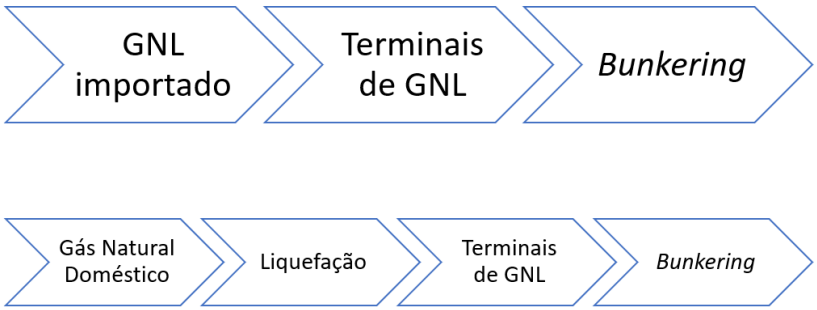

Figura 2.12: Rotas GNL
Fonte: Elaboração Própria

Bunkering ou Abastecimento

O desenvolvimento e a propagação do GNL como combustível marítimo exigirá a construção e desenvolvimento de infraestrutura de abastecimento de combustível dedicada. Existem 3 principais possibilidades para o *Bunkering* de navios a GNL:

1. Caminhão para navio ou *Truck to ship* (TTS)
2. Navio para navio ou *Ship to Ship* STS
3. Tanque em terra para navio *Shore tank to Ship* (TPS)

Na opção TTS o caminhão de GNL é conectado ao navio receptor no cais, usando uma mangueira flexível, auxiliada tipicamente por um guindaste cantilever manual de manuseio de mangueira. O volume típico dessa operação é de 50 a 100 m^3 e a vazão de 40 a 50 m^3 por hora. Na opção STS, o GNL é entregue aos navios receptores por outro navio, barco ou barcaça, atracado no lado oposto ao cais. O volume típico dessa operação é de 100 a 6500 m^3 e a vazão de 500 a 1000 m^3 por hora. A última opção TPS ou PTS, o GNL é armazenado e transferido diretamente de uma pequena unidade de armazenamento (tanque de GNL) de combustível GNL para o navio. O volume típico dessa operação é de 500 a 200000 m^3 e a vazão de 1000 a 2000 m^3 por hora [23].

O TTS possui as seguintes vantagens: flexibilidade operacional; pequenas limitações de infraestrutura; possibilidade de ajustar os volumes entregues (número de caminhões) às diferentes necessidades do cliente; possibilidade de se adaptar a diferentes requisitos de segurança; possibilidade de atender diferentes usuários de combustível GNL na entrega ponto a ponto. As desvantagens são: capacidade limitada de caminhões: aproximadamente 40-80 m3; vazões limitadas; impacto significativo em outras operações envolvendo passageiros ou carga; movimento limitado

no cais, principalmente influenciado pela presença do(s) caminhão(s) de combustível; exposição a eventuais limitações na estrada (licenças, limitações físicas, tráfego relacionado, etc.)

A opção STS possui as seguintes vantagens:

- Geralmente não interfere nas operações de movimentação de carga / passageiros.
- Opção mais favorável para abastecimento de GNL, especialmente para navios com pouco tempo de resposta no porto
- Flexibilidade operacional - o abastecimento de combustível pode ocorrer ao lado, com a embarcação receptora atracada, ancorada ou na estação.

Desvantagens:

- Custos de investimento inicial que envolvem projeto, aquisição, construção e operação de uma embarcação / barcaça movida a GNL.
- Impacto significativo nos valores de custo do ciclo de vida para os negócios específicos de bunkers de GNL.
- Tamanho limitado para o navio-tanque, condicionado pelas limitações do porto.

A opção PTS possui a vantagem de entrega de grandes volumes de GNL em alta vazão. É uma boa opção para portos com demanda constante e longos contratos para o GNL. As desvantagens são a dificuldade operacionais e necessidade de grandes suprimentos de GNL.

A Figura 2.13 demonstra essas 3 possibilidades.

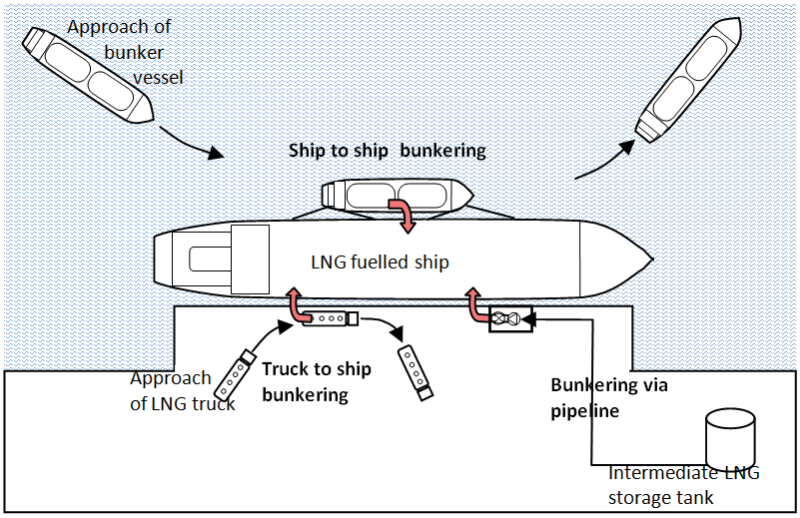

Figura 2.13: Opçoes de Bunkering
Fonte: [24]

Benefícios Ambientais

Os navios geram emissões significativas de material particulado fino (MP2.5), NOx e SOx que contribuem para a má qualidade do ar. As emissões para o ar dos navios causam danos à saúde pública, contribuem para a diminuição da visibilidade e outros impactos ambientais prejudiciais. Os principais tipos de emissão do processo de combustão em uma combustão interna são CO_2, NOx, SOx e MP. A quantidade depende do tipo de combustível e do processo de combustão. O CO_2 é um gás de efeito estufa que está entre os responsáveis pelo aquecimento global. O NOx é formado devido à alta temperatura e pressão durante o processo de combustão e contribui para a formação de fumaça, além de contribuir para a formação de ozônio no nível do solo. SOx causa chuva ácida e tem um impacto negativo na saúde pública. A redução das emissões de CO_2 pode ser compensada por emissões fugitivas de metano. A quantidade de emissão de SOx está diretamente relacionada à quantidade de enxofre presente no combustível. [24].

Um ponto importante a ressaltar são as emissões fugitivas de metano e a queima incompleta do combustível resultando em escamento do metano. Para uma avaliação de benefício ambientais em termos da GEE, é necessário verificar toda a cadeia de produção do gás natural, visto que o GWP (*Global Warming Potential* do metano é 28 vezes maior do que o do CO_2

Motorização

Medium speed 4-stroke lean burn spark ignition (LBSI) engines

Esses motores funcionam apenas com gás natural e operam com base no sistema de ciclo Otto. Uma vela de ignição é usada para inflamar a mistura ar-combustível

na câmara de combustão ou em uma pré-câmara. Os tipos de navios mais comuns para esse motor são: balsas, pequenos navios de carga, embarcações de apoio offshore e outras pequenas embarcações [25].

Low speed 2-stroke low-pressure dual-fuel (LS-LPDF) engines

Os maiores motores desse tipo operam de forma similar ao de 4 tempos, porém o gás é injetado a baixa pressão no cilindro antes da compressão [25].

Low speed 2-stroke high pressure dual-fuel (LS-HPDF) engines

Diferentemente dos outros motores, esse opera no ciclo diesel. O gás natural em alta pressão é injetado no cilindro antes da ignição por compressão. O gás é injetado através de um combustível piloto (MGO). A injeção direta de gás assegura menores emissões fugitivas de metano [25].

Devido a maior presença de navios de longa distâncias a dois tempos, os motores dual fuel são os melhores candidatos para serem implementados nos navios no Brasil.

Navios a GNL

Os navios a GNL, devido a necessidade de armazenamento diferenciando do GNL e do menor poder calorífico em base volumétrica, perdem espaço de carga com a mudança de combustível. Essa perda pode ser um possível empecilho a modificação de motorização dos navios [26].

O sistema de GNL com bomba usa uma bomba submersa para fornecer a pressão exigida pelos motores. Para um motor com duplo combustível, isso é de cerca de 6 a 8 bar, para motores a gás a pressão pode ser menor em torno de 2 a 3 bar. Ao usar uma bomba, o tanque em si pode ser mantido a uma pressão mais baixa, o que é favorável ao tempo de retenção do tanque. A escolha da bomba é determinada pela quantidade de combustível consumida pelos motores (Figura 2.14) [27].

No Sistema de GNL com aumento de pressão, todo o tanque será submetido à pressão exigida pelos motores. A PBU (*pressure build-up*) aumenta a pressão vaporizando uma pequena porção de GNL toda vez que a pressão no tanque fica baixa. O GNL pressurizado é empurrado através do vaporizador para os motores. Esse projeto é o mais simples e mais barato de construir, mas tem a desvantagem de que, se nenhum combustível for consumido, a pressão no tanque alcançou rapidamente sua pressão máxima de ajuste. Como a descarga de gás geralmente não é aceitável, é necessário dar partida no(s) motor(es) para manter a pressão no tanque em um nível predefinido (Figura 2.15).

Por último existe a possibilidade de fornecer o gás com um compressor para o motor. Esse tipo de sistema é frequentemente usado em navios-tanque de GNL. O

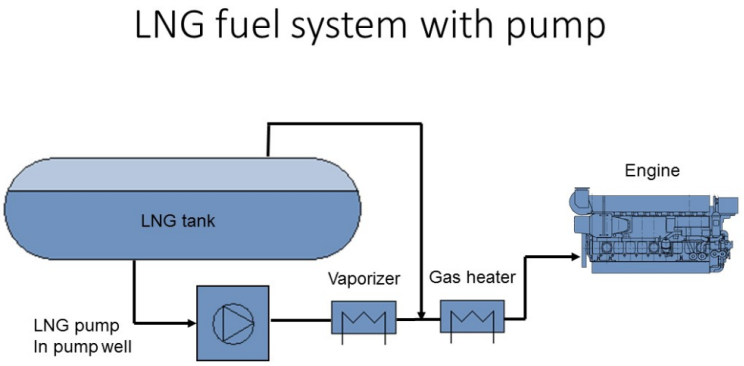

Figura 2.14: LNG pump
Fonte:[27]

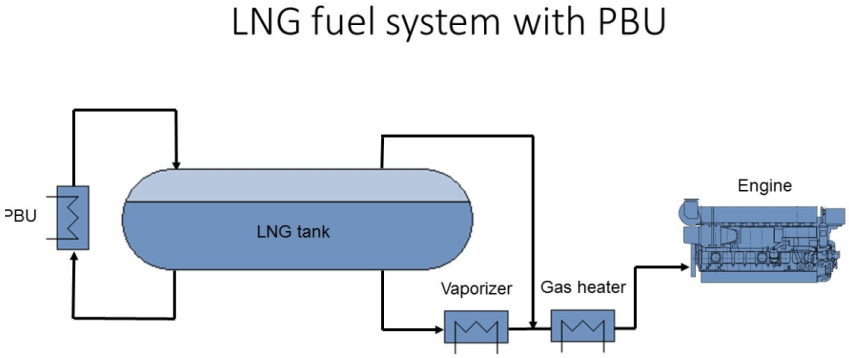

Figura 2.15: PBU
Fonte:[27]

design é muito flexível no uso. Uma desvantagem é que os compressores aquecem o gás. Os inter-resfriadores e pós-resfriadores montados nos compressores mantêm a temperatura do gás dentro de limites aceitáveis (Figura 2.16).

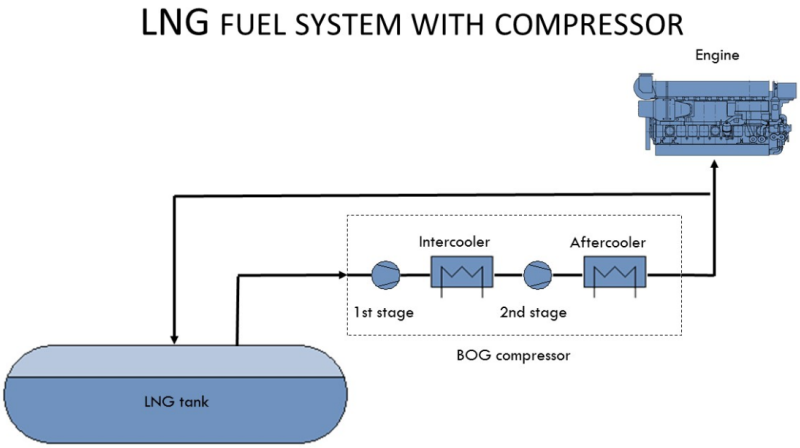

Figura 2.16: Compressor
Fonte:[27]

2.6 Mercado de Gás no Brasil

Em 2015 a demanda de gás natural no Brasil foi, em média, de 98,63 Milhões de m^3/dia, sendo a maior parte consumida pelo setor industrial e pelas usinas geradores de energia elétrica. Em 2019, a média diária caiu para 76,51 milhões de m^3/dia devido, principalmente, a redução do uso para geração elétrica [28]. A Figura 2.17 mostra a trajetória da demanda de gás natural por setor no Brasil.

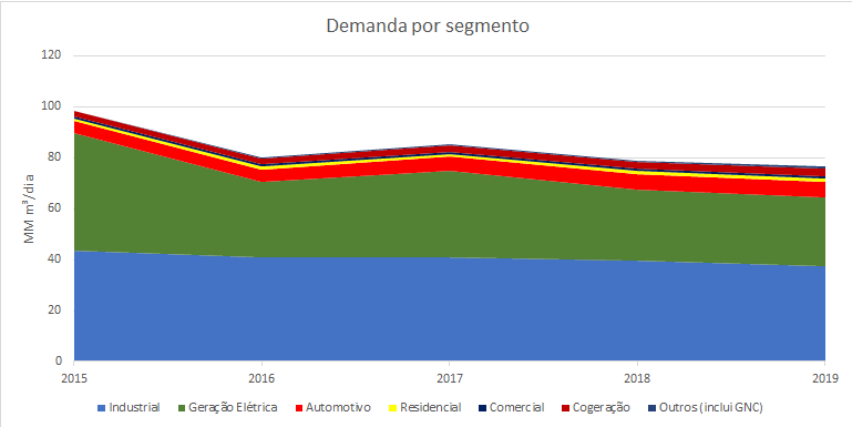

Figura 2.17: Demanda de gás natural por segmento no Brasil
Fonte:[28]

Do lado da oferta, a maior parte provem da produção nacional, que em 2019 foi em média de 55,67 milhões de m^3/dia líquida. A oferta nacional se dá pela produção menos a reinjeção, perdas e queimas e consumo próprio nas plataformas. Vale ressaltar a importação do gás boliviano na oferta no Brasil. Apesar da diminuição de 32,03 Mm^3/dia em 2015 para 16,99 Mm^3/dia em 2019, ele ainda é de grande importância no cenário nacional. A Figura 2.18 mostra a evolução da oferta no

período entre 2015 a 2019.

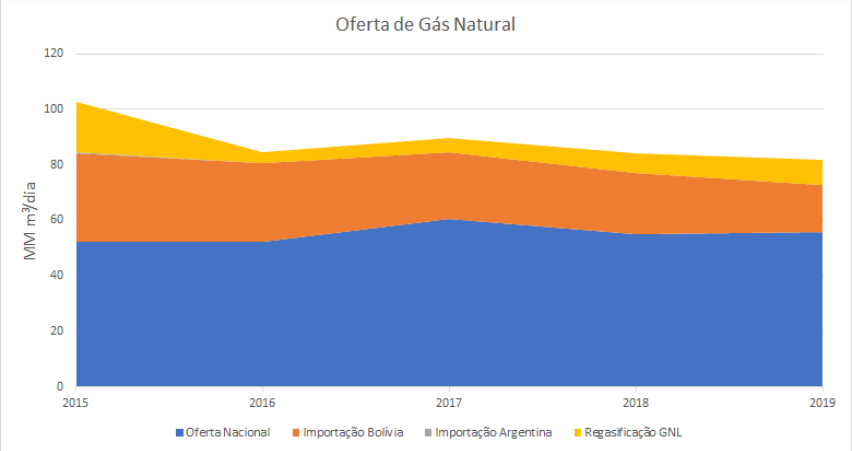

Figura 2.18: Oferta de gás natural no Brasil
Fonte:[28]

O próximo capítulo irá mostrar a metodologia que foi desenvolvida neste trabalho para estimar o consumo de bunker na cabotagem no Brasil e, posteriormente, as projeções de penetração de GNL como combustível Marítimo. Por fim, a metologia de previsão de custos de duas estratégias de motorização serão introduzidas, a estratégia "GNL"e a estratégia "Bunker".

Capítulo 3

Metodologia

No Capítulo 2 discutiu-se o cenário atual da cabotagem no Brasil em relação a frota e a carga transportada assim como os principais combustíveis marítimo e sua possível alternativa, o GNL. No fim do capitulo houve uma breve discussão sobre os aspectos regulatórios e o mercado de gás no Brasil.

Neste capítulo, propô-se uma metodologia quantitativa do potencial da cabotagem em relação à evolução da carga transportada, baseada em dois cenários. A partir desses cenários, criaram-se premissas para entrada de GNL de maneira a estimar limites máximo e mínimo de utilização deste combustível. A ideia dessa cenarização é identificar patamares de inserção de GNL na cabotagem no Brasil e não definir o valor exato da quantidade de gás.

A metodologia é desenvolvida para navios-tanque, porta contêineres e graneleiros devido a maior importância dessas 3 classes de navios na cabotagem no Brasil. Os navios da classe “Carga Geral"foram deixados de lado devido ao pouco percentual de carga que os mesmo transportam se comparados as outras 3 classes.

O desenvolvimento da metodologia parte do mapeamento das rotas marítimas associadas aos 3 grupos de produtos (Graneis líquidos, Graneis Sólidos e Contêineres). Para os navios-tanque e graneleiros a mesma metodologia é aplicada, diferentemente dos navios porta contêineres, pois, devido a, principalmente, o valor da carga, sua logística é diferente das demais classes.

Este capítulo será estruturado consoante o fluxograma da Figura 3.1, que mostra os diferentes passos do procedimento metodológico. O desenvolvimento parte de um levantamento de dados de trocas comerciais entre portos por tipologia de produto por ano (passo 1) assim como o número de viagens (passo 2), cujo detalhamento se dá na seção Seção 3.1. Para os porta-contêineres, as informações estão na Seção 3.2. No passo 3, apresentam-se as premissas de caracterização do navio por porte e suas características segundo a seção Seção 3.3. Na Seção 3.4, desenvolve-se uma rotina de cálculos para a estimativa de consumo de combustível por navio. A Seção 3.6 descreve o consumo referente aos motores. A Seção 3.7 descreve as cenarizações e a

Seção 3.8 descreve a metodologia para o cálculo de duas estratégias de motorização.

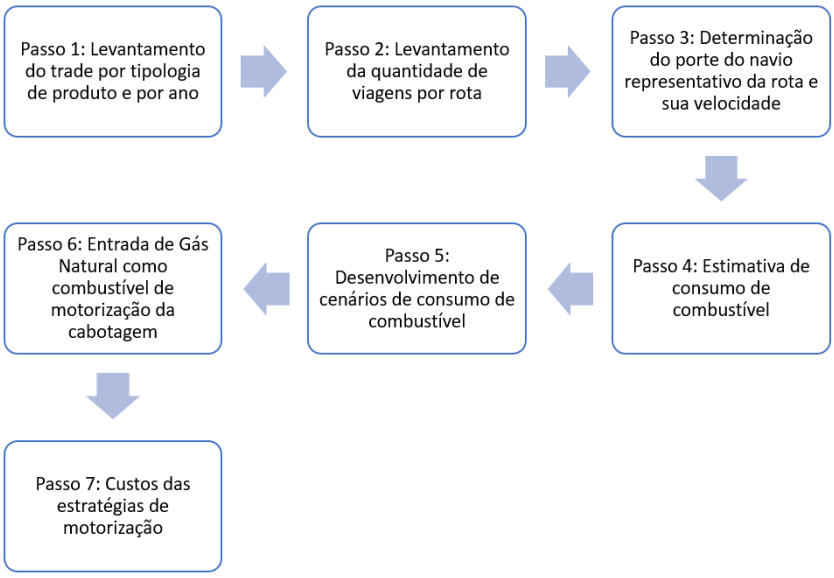

Figura 3.1: Fluxograma do procedimento metodológico
Fonte: Elaboração Própria

3.1 Comércio entre os Portos de Petroleiros e Graneleiros

3.1.1 Mapeamento e seleção das rotas

A fim de mapear as principais rotas na cabotagem, utilizou-se como base o Anuário Antaq [7] aonde estão disponível dados dos fluxos comerciais do grupo de produtos selecionados entre portos no Brasil a partir de 2010. O anuário é uma ferramenta interativa na qual se pode colocar filtros e selecionar os dados que forem desejados. E pode ser selecionado o filtro no porto desejado e retirado o valor de comércio entre ele e os outros portos. Para os graneleiros, todas as rotas foram selecionado, já para os petroleiros, as 50 principais rotas foram introduzidas e o resto foi somado e criada uma rota chamada "Resto", na qual a distância percorrida é a média das distâncias das outras rotas.

A Tabela 3.1 abaixo foi exemplifica a metodologia proposta para as rotas. A primeira coluna é a numeração da rota. A segunda coluna é a origem e a terceira é o destino da embarcação. A quantidade transportada se dá em tonelada e está representada na coluna 4. A distância percorrida foi retirada de [29] (coluna 5) e está expressa em Milhas Náuticas (MN)[1] navegadas. O número de atracações é número

[1] 1 MN é igual à 1,852 km

de viagens realizada na rota, representada na coluna 6. Foram produzidas tabelas semelhantes para os anos de 2011 a 2018, podendo ser visualizada no Apêndice A

Tabela 3.1: Rotas Graneleiros em 2018

Rota	Origem	Destino	Quantidade Transportada (t)	Distância Percorrida (MN)	Número de Atracações
1	Trombetas	Terminal Portuário Privativo da Alumar	4.810.504	969	179
2	Trombetas	Vila do Conde	2.657.284	747	78
3	Ponta da Madeira	Pecém	3.489.123	366	57
4	Ponta da Madeira	Praia Mole	1.432.169	1582	29
5	Ponta da Madeira	Gerdau Açus Longo	152.874	1164	4
6	Juruti	Terminal Portuário Privativo da Alumar	4.831.260	936	179
7	Vitória	Pecém	1.236.361	1224	12
8	Vitória	Porto Chibatão	48.945	2739	2
9	Itaguaí	Praia Mole	90.597	331	1
10	Porto do Açu	Terminal Portuário Privativo da Alumar	42.975	222	1
11	Porto do Açu	Vila do Conde	42.814	1989	1
12	Ladário	TERNIUM BR	21.174	1000	1
13	Belém	Gerdau Aços Longos	4760	1452	1

Fonte: Elaboração Própria com dados de [7]

3.1.2 Definição da categoria de navio por rota

Para simular a rota, um navio da categoria característica da rota é definido. Conforme mostrado no Capítulo 2, os petroleiros e graneleiros podem ser classificados como a Tabela 3.2:

Para determinar o navio característico de cada rota é feita a divisão entre o total transportado em toneladas e a quantidade de viagens realizadas. Portanto, a Tabela 3.3 exemplifica para o ano de 2018, os navios graneleiros característicos de cada rota.

Tabela 3.2: Categoria por porte de petroleiros e graneleiros

Categoria Porte (tpb)	
Pequenos petroleiros e graneleiros	até 10 000
Handysize	10 000 - 30 000
Handymax	30 000 - 55 000
Panamax	60 000 - 75 000
Aframax	80 000 - 120 000
Suezmax	125 000 - 170 000
VLCC	250 000 - 320 000
ULCC	acima de 350 000

Fonte: Elaboração Própria com dados de [11]

Tabela 3.3: Rotas Graneleiros e Navios Característicos em 2018

Rota	Origem	Destino	Navio característico	Porte
1	Trombetas	Terminal Portuário Privativo da Alumar	Handysize	26874
2	Trombetas	Vila do Conde	Handymax	34068
3	Ponta da Madeira	Pecém	Panamax	61213
4	Ponta da Madeira	Praia Mole	Handymax	49385
5	Ponta da Madeira	Gerdau Açus Longo	Handymax	38219
6	Juruti	Terminal Portuário Privativo da Alumar	Handysize	26990
7	Vitória	Pecém	Capesize	103030
8	Vitória	Porto Chibatão	Handysize	24473
9	Itaguaí	Praia Mole	Capesize	90597
10	Porto do Açu	Terminal Portuário Privativo da Alumar	Handymax	42975
11	Porto do Açu	Vila do Conde	Handymax	42814
12	Ladário	TERNIUM BR	Handysize	21174
13	Belém	Gerdau Aços Longos	Pequeno Granleiro	4760

Fonte: Elaboração Própria

3.1.3 Definição das Velocidades

A velocidade é definida através de um relatório elaborado pela MAN Diesel & Turbo. Adotou-se também velocidade constante para toda a viagem, visto que o perfil de velocidade tem variações pequenas para diferentes condições de carga e lastro [30]. Para os petroleiros, as velocidades seguem os dados apresentado na Tabela 3.4. Para os graneleiros, as velocidade seguem os dados Tabela 3.5.

Tabela 3.4: Velocidade de projeto de Petroleiros

Porte	Velocidade (nós)
Pequenos Petroleiros	14,0
Handysize	15,0
Handymax	15,0
Panamax	15,0
Aframax	15,0
Suezmax	15,0
VLCC	15,5
ULCC	16,0

Fonte: Elaboração Própria com dados de [11]

Tabela 3.5: Velocidade de projeto de Graneleiros

Porte	Velocidade (nós)
Pequenos Graneleiros	13,0
Handysize	14,2
Handymax	14,5
Panamax	14,5
Aframax	14,5
Suezmax	14,7
VLBC	14,7

Fonte: Elaboração Própria com dados de [12]

3.2 Comércio entre os Portos de Porta Contêineres

3.2.1 Mapeamento e seleção das rotas

Para os navios porta contêineres há uma diferenciação de escolha dos principais portos. Como a logística dos navios difere das outras duas classes, existe a necessidade de modificar a metodologia. A metodologia se baseia na criação de clusters portuários, conforme um estudo realizado pela ILOS [31], que determinou quais seriam os principais clusters no Brasil para o comércio de exportação de contêineres.

Conforme a metodologia apresentada pelo estudo citado, são levantando dados de movimentação portuário para o transporte de cabotagem do Brasil nos portos definidos nos clustres. A partir desse levantamento, cria-se uma nova seleção de portos para definir os clusters para a cabotagem.

Houve apenas uma pequena diferenciação em relação ao estudo da ILOS. A região Norte (São Luís do estudo da ILOS) não foi selecionada por sua menor importância na movimentação de contêineres na cabotagem. A Tabela 3.6 mostra os portos selecionados, sua região geográfica no Brasil, a movimentação de contêineres em TEU e o cluster aonde está localizado.

Portanto, os clusters selecionados foram:

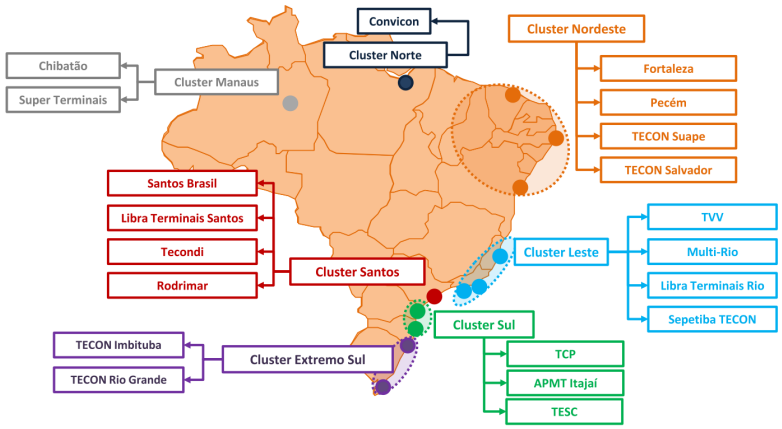

Figura 3.2: Clusters Segundo a ILOS

Fonte: [31]

Tabela 3.6: Movimentação Portuária

Porto	Região Geográfica	Movimentação (TEU)	Cluster
Super Terminais	Norte	134.732	Manaus
Porto Chibatão	Norte	250.990	Manaus
Suape	Nordeste	347.302	Nordeste
Pecém	Nordeste	222.226	Nordeste
Salvador	Nordeste	121.163	Nordeste
Fortaleza	Nordeste	32.338	Nordeste
Itaguaí	Sudeste	172.731	Leste
Vitória	Sudeste	79.035	Leste
Rio de Janeiro	Sudeste	59.289	Leste
Santos	Sudeste	599.410	Santos
Paranaguá	Sul	93.648	Sul
Itajaí	Sul	118.200	Sul
Rio Grande	Sul	127.194	Extremo Sul
Itapoá	Sul	124.599	Extremo Sul

Fonte: Elaboração Própria com dados de [7]

- Manaus - Super Terminais e Porto de Chibatão
- Nordeste - Suape, Pecém, Fortaleza e Salvador
- Leste - Vitória, Rio de Janeiro e Itaguaí
- Santos - Santos
- Sul - Paranaguá e Itajaí
- Extremo Sul - Rio Grande e Itapoá

3.2.2 Número de viagens entre os Clusters

Nesta seção é definido o número de viagens realizados entre os clusters. Esse estudo adotou a premissa de que um cluster não pode ser pulado, a não ser que o cluster "Santos"esteja envolvido devido sua maior importância na movimentação de contêineres. Por exemplo, um navio que saia do cluster "Manaus"não pode ir diretamente para o cluster "Leste". Os casos em que são permitidos um salto são os navios saindo dos clusters "Nordeste"e "Extremo Sul". Estes podem pular os clusters "Leste"e "Sul"respectivamente e irem diretamente para o cluster "Santos". O mesmo vale para os navios que saem do cluster "Santos". Estes podem pular os clusters "Leste"e "Sul"e irem diretamente para os clusters "Nordeste"e "Extremo Sul"respectivamente. A Figura 3.3 exemplifica essa premissa.

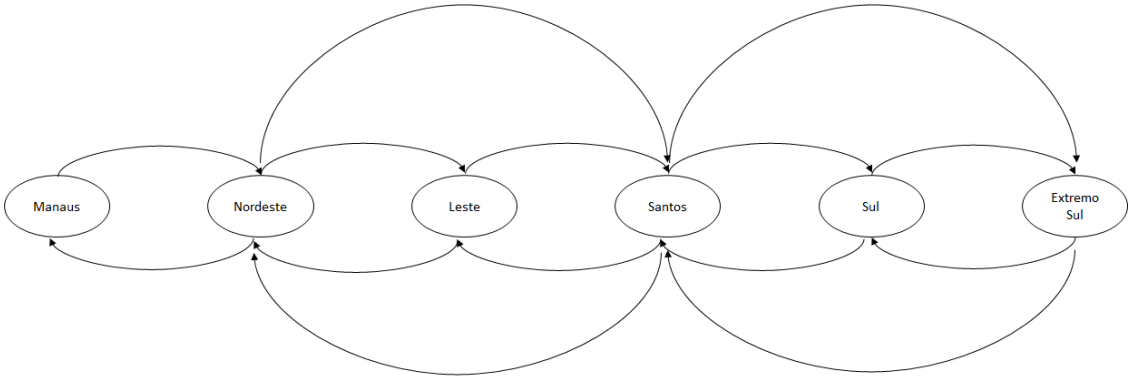

Figura 3.3: Cluster Viagens
Fonte: Elaboração Própria

A contagem de viagens é feita a partir da soma dos portos do cluster de origem para o de destino, dividindo o valor pela soma de portos no de destino. Por exemplo: a troca entre o cluster Manaus e Nordeste. Soma-se as saídas dos Portos de Chibatão e Super Terminais com destino a Fortaleza, Suape, Pecém e Salvador e divide o valor por 4. Dessa maneira a dupla contagem e as vagens dentro do mesmo cluster são evitadas. Por exemplo, na contagem de atrações no anuário de uma partida de Manaus podem estar relacionados os portos de Pecém e de Salvador. Ao atracar em Pecém, um novo registro de viagem é feito, indicando Salvador como destino. No caso nos saltos de clusters o valor definido é a subtração da quantidade de viagens da origem menos o destino com o valor da origem com o cluster saltado. A Tabela 3.7 mostra as viagens entre os clusters no ano de 2018. O restante das tabelas estão no Apêndice A.

Tabela 3.7: Viagens dos navios porta contêineres entre os clusters em 2018

Rota	Origem	Destino	Distância (MN)	Nº de Viagens
1	Manaus	Nordeste	1954	259
2	Nordeste	Leste	1000	252
3	Leste	Santos	400	353
4	Santos	Sul	220	224
5	Sul	Extremo Sul	400	34
6	Nordeste	Santos	1200	503
7	Santos	Extremo Sul	600	0
8	Extremo Sul	Sul	400	60
9	Sul	Santos	220	174
10	Santos	Leste	400	363
11	Leste	Nordeste	1000	364
12	Nordeste	Manaus	1954	294
13	Extremo Sul	Santos	600	174
14	Santos	Nordeste	1200	272

Fonte: Elaboração Própria com dados de [12]

3.2.3 Definição das Velocidades dos Porta Contêineres

Para os navios porta contêineres adotaram-se as velocidades verificadas com dados da plataforma *Big Ocean Data* [32], no qual o navio é monitorado por um sistema AIS (*Automatic Identification System*) e seus dados, como a velocidades, são salvos na plataforma do site. As velocidades foram definidas conforme as rotas.

Tabela 3.8: Velocidade dos navios porta contêineres entre os clusters

Origem	Destino	Velocidade (knots)
Manaus	Nordeste	15,0
Nordeste	Leste	15,0
Leste	Santos	11,0
Santos	Sul	16,0
Sul	Extremo Sul	10,0
Nordeste	Santos	15,0
Santos	Extremo Sul	16,0

Fonte: Elaboração Própria

3.3 Caracterização dos navios

Através de um modelo simplificado de resistência ao avanço e propulsão, é possível determinar parâmetros essenciais para caracterização dos navios.

3.3.1 Principais dimensões de um navio

Em termos de geometria das embarcações, as principais grandezas lineares são o comprimento na linha d'agua (L), a boca moldada (B) e o calado (D). O comprimento da linha de água é o comprimento do navio na linha de água, a boca moldada é a dimensão máxima transversal do navio, o calado é a dimensão entre a quilha e a linha de água, quando o navio flutua [33].

Outras grandezas no contexto naval são o peso leve (LWT), o peso morto (DWT) e o deslocamento ∇. O peso leve corresponde à massa da embarcação em si, enquanto o peso morto diz respeito à massa variável que o navio carrega . Já o deslocamento ∇ é a soma dessas duas grandezas, indicando portanto a massa de água deslocada pela embarcação em repouso.

Cabe finalmente conceituar o coeficiente de bloco C_B, principal fator de caracterização da forma do casco de uma embarcação.É nítido pela Equação 3.1.

$$C_B = \frac{\nabla}{LBD} \tag{3.1}$$

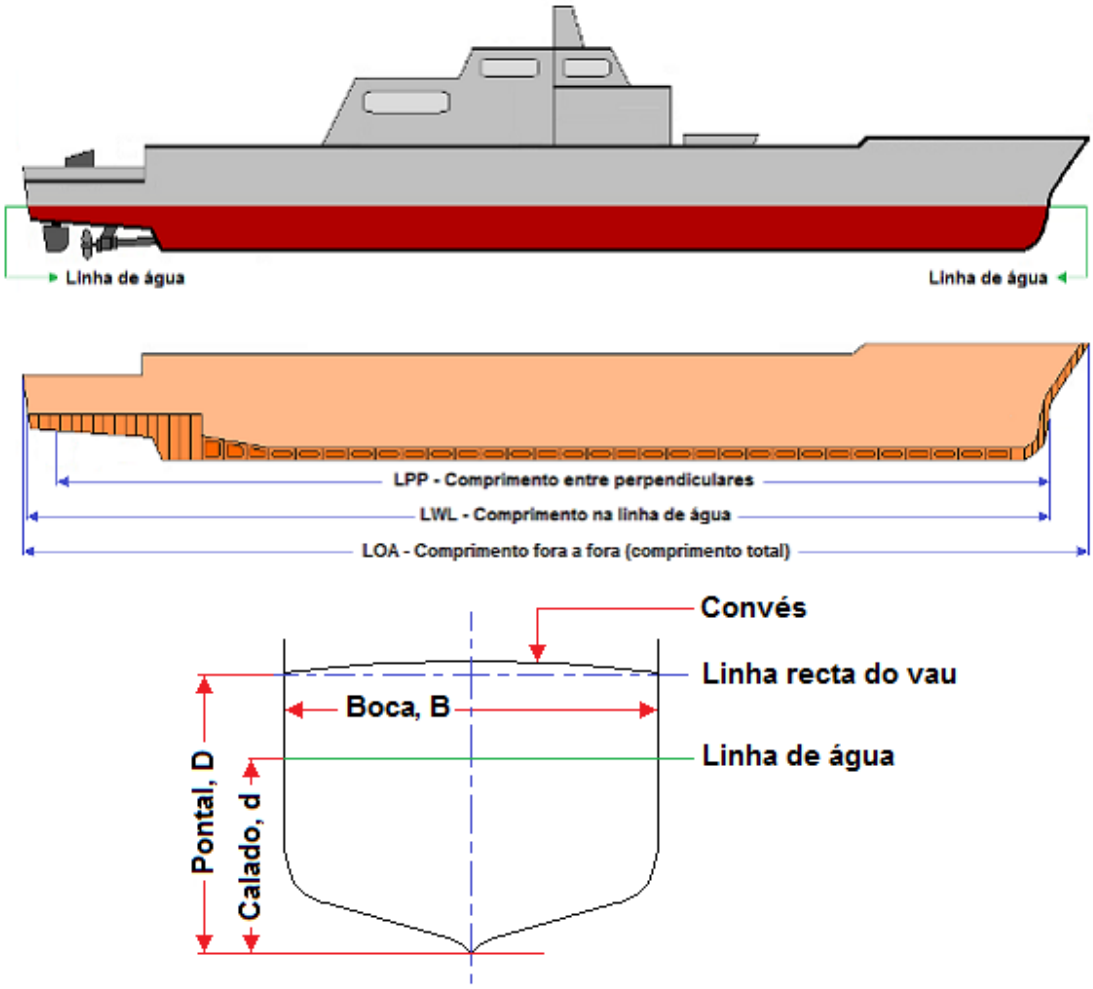

Figura 3.4: Principais dimensões dos navios
Fonte:[33]

3.3.2 Levantamento das dimensões lineares e do peso leve como função do porte

Apesar das diferentes arquiteturas possíveis de navios, as principais dimensões podem ser estimadas com base em seu porte. As equações do Apêndice B estimam as principais dimensões dos navios e seu peso segundo o seu porte [34][35]. Como exemplo, a Tabela 3.9 mostra as dimensões nos navios graneleiros citados na Tabela 3.3

Tabela 3.9: Dimensões graneleiros de 2018

DWT	L_{pp} (m)	B (m)	$D_{projeto}$ (m)	LWT
26874	163	26	9	5026
34068	170	28	10	5576
61213	194	32	13	6693
49385	182	32	12	6418
38219	174	29	11	5852
26990	162	26	49	4941
103030	232	40	15	10270
24473	150	26	10	4460
90597	224	39	14	9308
42975	176	30	11	6098
42814	176	30	11	6098
21174	144	24	16	4024
4760	92	16	6	1300

Fonte: Elaboração Própria

3.4 Hipóteses de distinção das Viagens

Conforme a distinção entre as metodologias de graneleiros e petroleiros e dos porta contêineres, surge necessidade de distinguir também as viagens realizadas pelos navios. Esta seção mostra como é feita a diferenciação de viagens.

3.4.1 Petroleiros e Graneleiros

Devido à especificidade da carga, os navios petroleiros e graneleiros estão carregados apenas durante metade do tempo em curso. Após uma viagem de ida, o navio entrega a carga e em seguida, volta com lastro [36]. Durante a viagem de volta, utiliza-se os tanques de lastro, cuja função é estabilizar o navio, aumentando seu peso morto com a própria água do mar [37].

A diferença entre essas duas condições é significativas e, portanto, optou-se por representá-las de formas distintas conforme as premissas apresentadas abaixo.

Viagem de Ida (*ladan voyage*)

No caso da viagem de ida, são consideradas operações conforme as condições de projeto, ou seja:

- navio a plena carga (DWT = DWT_{max})
- calado de projeto (D = D*projeto*)

3.4.2 Viagem de volta (*ballast voyage*)

No caso da viagem de volta, assume-se as seguintes hipóteses:

- navio com lastro, com peso morto total igual à metade do máximo (DWT = 0,5 DWTmax) [38]

A Figura 3.5 resume a viagem dos navios petroleiros e graneleiros.

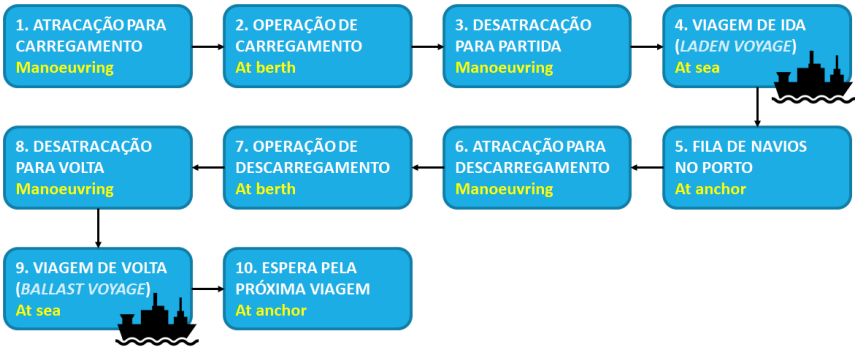

Figura 3.5: Viagem de Petroleiros e Graneleiros
Fonte: Elaboração Própria

3.4.3 Porta Contêineres

Já para o porta contêineres é considerada a viagem só como uma viagem de ida. Devido a complexidade da logística do navio, é difícil determinar a taxa de ocupação da carga transportada pela embarcação e suas rotas são menos previsíveis [39]. Portanto, foram consideradas as etapas desde a atracação no porto de origem até a desatracação no porto destino. Em relação a taxa de ocupação, é utilizada a taxa de 50% de carregamento do navio [40].

Figura 3.6: Viagem de Porta Contêiner
Fonte: Elaboração Própria

3.5 Resistência ao avanço e propulsão

Esta sessão etapa irá elaborar um modelo de resistência ao avanço e propulsão. O modelo é baseado em [41].

3.5.1 Resistência ao avanço

De maneira a estimar a potência de propulsão (P_P), primeiramente é necessário calcular os coeficientes de resistências que se aplicam às embarcações. Esses coeficientes são: Coeficiente de Resistência Friccional, Coeficiente de Resistência do Ar, Coeficiente de Resistência Friccional Incremental e Coeficiente de Resistência Residual. A soma dessas resistências pode ser denominada Coeficiente Total, C_T,

$$C_T = C_F + C_{AA} + C_A + C_r \tag{3.2}$$

Resistência Friccional

O coeficiente de resistência friccional ao atrito é definido por:

$$C_F = \frac{0,075}{(logR_e - 2)^2} \tag{3.3}$$

em que R_e é o número de Reynolds dado por:

$$R_e = \frac{v\ L_{wL}}{\nu} \tag{3.4}$$

em que v é a velocidade da embarcação, L_{wL} é o comprimento da linha d'água e ν é a viscosidade cinemática da água do mar (1,22 mm^2/s a 15°C) [42].

Resistência do Ar

A resistência do ar causada pelo movimento do navio deve ser incluída no procedimento de cálculo da resistência. A Tabela 3.10 mostra os valores do coeficiente de resistência do ar para os portes de navios petroleiros e graneleiros.

Tabela 3.10: Coeficiente de Resistência do Ar para Petroleiros e Graneleiros

	$C_{AA}\ 10^3$
Pequenos Petroleiros	0,07
Handysize	0,07
Handymax	0,07
Panamax	0,05
Aframax	0,05
Suezmax	0,05
VLCC	0,04

Fonte: Elaboração Própria com dados de [41]

Para os porta contêineres, o coeficiente de resistência do ar se dá pela seguinte Equação 3.5,

$$C_{\mathrm{AA}}.1000 = 0,28\ TEU^{-0,126} \tag{3.5}$$

Resistência Friccional Incremental

O coeficiente de resistência ao atrito está relacionado à rugosidade da superfície do casco. No entanto, a rugosidade da superfície do modelo será diferente da rugosidade do casco do navio. Portanto, ao extrapolar para o tamanho do navio, um coeficiente de resistência incremental C_A é adicionado para incluir o efeito da rugosidade da superfície do navio. O valor do C_A é dado pela Equação 3.6;

$$1000\ C_{\mathrm{A}} = Máximo(-0,1;\ 0,5\ log(\nabla) - 0,1\ (log(\nabla))^2) \tag{3.6}$$

Coeficiente de Resistência Residual

A resistência residual inclui resistência às ondas, resistência à pressão viscosa e resistência adicional devido à forma ou curvatura do casco. Para determinar o coeficiente de resistência residual, utiliza-se a Equação 3.7:

$$C_{\mathrm{R}} * 1000 = 112229\ {F_{\mathrm{n}}}^5 - 90275\ {F_{\mathrm{n}}}^4 + 29064\ {F_{\mathrm{n}}}^3 - 4576,65\ {F_{\mathrm{n}}}^2 + 352,54 F_{\mathrm{n}} - 10,15 \tag{3.7}$$

onde F_n é o número de Froude calculado pela Equação 3.8,

$$F_{\mathrm{n}} = \frac{v}{\sqrt{g\ L}} \tag{3.8}$$

no qual g é o valor da gravidade e L é o comprimento de linha d'água.

Resistência Total

A resistência total pode ser calculada através da Equação 3.9,

$$R_{\mathrm{T}} = \frac{1}{2} C_{\mathrm{T}}\ \rho\ S\ v^2 \tag{3.9}$$

em que ρ é a densidade da água do mar (1029 kg/m^3) [43], S, a superfície molhada do casco e v a velocidade da embarcação.

A superfície molhada é normalmente calculada por programas hidrostáticos. No entanto, para uma estimativa rápida e bastante precisa da superfície molhada, existem muitos métodos e fórmulas diferentes com base em apenas algumas dimensões principais do navio, como por exemplo a fórmula de Mumford abaixo, que é dividida por tipo de embarcação. A Equação 3.10 mostra a equação para petroleiros e graneleiros e a Equação 3.11 para porta contêineres.

$$S = 0,99(\frac{\nabla}{T} + 1,9\ L_{\mathrm{wl}}\ T) \tag{3.10}$$

$$S = 0,995(\frac{\nabla}{T} + 1,9\ L_{\mathrm{wl}}\ T) \tag{3.11}$$

Potência Efetiva

A potência efetiva é calculada pela Equação 3.12,

$$P_{\mathrm{E}} = R_{\mathrm{T}}\ v \tag{3.12}$$

Eficiência de Propulsão

A eficiência de propulsão pode ser dividade em 4 fatores: eficiência de casco, (η_{h}), eficiência da hélice, (η_{o}), eficiência rotativa, (η_{R}) e eficiência da transmissão mecânica, (η_{S}). As equações dessas eficiências estão demostradas em Apêndice C. Eficiência de hélice é a razão entre a quantidade de trabalho necessária para rebocar um determinado casco a uma velocidade determinada e a quantidade de trabalho necessária de uma determinada hélice. A eficiência da hélice é definida como a energia produzida (potência da hélice) dividida pela potência aplicada (potência do motor). A eficiência relativa rotativa é a razão entre a velocidade antes e depois da hélice. E a eficiência de transmissão é a eficiência da potência de saída do eixo e a potência de entrada.

A eficiência total é a soma dessas 4 parcelas,

$$\eta_{\mathrm{T}} = \eta_{\mathrm{h}} * \eta_{\mathrm{o}} * \eta_{\mathrm{R}} * \eta_{\mathrm{S}} \tag{3.13}$$

Potência de Propulsão

Finalmente, é calculada a potência de propulsão pela Equação 3.14

$$P_{\mathrm{p}} = \frac{P_{\mathrm{E}}}{\eta_{\mathrm{T}}} \tag{3.14}$$

3.6 Consumo de Combustível

Nesta seção explica-se como foi calculado o consumo de combustível a partir dos cálculos conforme a Seção 3.5. Aborda-se também a metodologia para o consumo em caldeiras e motores auxiliares.

3.6.1 Motores Principais

No caso dos motores principais, associados à movimentação das embarcações, o cálculo da demanda de combustível está associada à potência de propulsão. O cálculo é feito pela utilização do consumo específico (SFOC, do inglês *Specific Fuel Oil Consumption*), que representa a razão entre taxa de consumo de combustível e potência do motor [44]. Portanto, o consumo de combustível de um sistema propulsivo de uma embarcação navegando por um tempo, t, como carga do motor igual a P_p se dá pela Equação 3.15,

$$m = SFOC\ P_p\ t \tag{3.15}$$

Existe uma estimativa de 190 g/kWh [45] para os navios construídos entre 1999 e 2009. Para os navios que consumirão GNL, o consumo específico é de 150 g/kWh [46].

3.6.2 Motores Auxiliares

O consumo nos motores auxiliares varia em função da potência nominal, da demanda por serviços auxiliares e do ano do equipamento [45]

Os termos da Tabela 3.11 são explicados abaixo:

- Atracado (at-berth): quando o navio se encontra no berço de atracação, inclusive quando está acontecendo operações de carregamento e descarregamento;
- Ancorado (at-anchor): quando o navio está ancorado, aguardando uma vaga no berço;
- Manobrando: refere-se ao movimento do navio no interior do quebra-mar;
- Em curso (at-sea): operação em curso do navio em água abertas.

Para se obter o consumo de combustível pelos motores auxiliares, foi estabelecido um consumo específico de 215 g/kWh para esse sistema [47].

3.6.3 Caldeiras

As caldeiras são responsáveis pela geração de calor no navio. A metodologia utilizada é idêntica à dos motores auxiliares. A Tabela 3.12 mostra os valores típicos das caldeiras nos navios.

Para as caldeiras utiliza-se o valor de 305 g/kWh para o consumo específico [45].

Tabela 3.11: Potência requerida dos motores auxiliares

		Motores Auxiliares (kW)			
Tipo do Navio	Porte (DWT ou TEU)	Atracado	Ancorado	Manobrando	Em curso
Graneleiro	0 - 9.999	280	190	310	190
	10.000 - 34.999	280	190	310	190
	35.000 - 59.999	370	260	420	260
	60.000 - 99.999	600	420	680	420
	100.000 - 199,999	600	420	680	420
	200.000+	600	420	680	420
Petroleiros	0 - 4.999	250	250	375	250
	5.000 - 9.999	375	375	563	375
	10.000 - 19.999	625	625	938	625
	20.000 - 59.999	750	750	1.125	750
	60.000 - 79.999	750	750	1.125	750
	80.000 - 119.999	1.000	1.000	1.500	1.000
	120.000 - 199.999	1.250	1.250	1.875	1.250
	200.000+	1.500	1.500	2.250	1.500
Porta Contêineres	0 - 999	340	300	550	300
	1.000 - 1.999	600	820	1.320	820
	2.000 - 2.999	700	1.230	1.800	1.230
	3.000 - 4.999	940	1.390	2.470	1.390
	5.000 - 7.999	970	1.420	2.600	1.420
	8.000 - 11.999	1.000	1.630	2.780	1.630
	12.000 - 14.500	1.200	1.960	3.330	1.960
	14.500+	1.320	2.160	3.670	2.160

Fonte: Elaboração Própria com dados de [45]

3.6.4 Tempos no porto

Para o tempo nos portos, são utilizados os valores no anuário da ANTAQ para o tempo de operação [7]. Para os tempos de atracação e desatracação são definidos valores iguais a 1,5 horas para cada um. A Tabela 3.13 resume os tempos utilizados.

Tabela 3.12: Potência Requerida das caldeiras

		Caldeiras (kW)			
Tipo do Navio	Porte (DWT ou TEU)	Atracado	Ancorado	Manobrando	Em curso
Graneleiro	0 - 9.999	50	50	50	0
	10.000 - 34.999	50	50	50	0
	35.000 - 59.999	100	100	100	0
	60.000 - 99.999	200	200	200	0
	100.000 - 199,999	200	200	200	0
	200.000+	200	200	200	0
Petroleiros	0 - 4.999	500	100	100	0
	5.000 - 9.999	750	150	150	0
	10.000 - 19.999	1.250	250	250	0
	20.000 - 59.999	1.500	300	300	150
	60.000 - 79.999	1.500	300	300	150
	80.000 - 119.999	2.000	400	400	200
	120.000 - 199.999	2.500	500	500	250
	200.000+	3.000	600	600	300
Porta Contêineres	0 - 999	120	120	120	0
	1.000 - 1.999	290	290	290	0
	2.000 - 2.999	350	350	350	0
	3.000 - 4.999	450	450	450	0
	5.000 - 7.999	450	450	450	1.420
	8.000 - 11.999	520	520	520	0
	12.000 - 14.500	630	1.630	630	0
	14.500+	700	700	700	0

Fonte: Elaboração Própria com dados de [45]

Tabela 3.13: Tempos médio nos portos em horas

Carga	Atracação	Operação	Desatracação
Granel Líquido e Gasoso	1,5	37,8	1,5
Granel Sólido	1,5	31,3	1,5
Carga Conteinerizada	1,5	18,6	1,5

Fonte: Elaboração Própria com dados de [7]

3.7 Cenários de entrada de GNL

3.7.1 Projeção para 2030

A metologia é realizada para estimar o consumo de bunker no período histórico de 2011 a 2018. É importante ressaltar que não existem estimativas precisas para esse consumo no Brasil. A partir desta seção começa a descrição da metodologia para cenários em 2030. A primeira etapa descrita é a projeção da evolução da carga transportada nas 3 diferentes classes segundo dois cenários distintos: cenário de alto crescimento (Cenário Limite Superior) e cenário de baixo crescimento (Cená-

rio Limite Inferior). É importante ressaltar a linearidade na relação entre carga transportada e consumo de combustível. A taxa de crescimento do consumo de combustível será a mesma do crescimento da carga transportada. Após a definição desses dois cenários, são identificadas duas variantes para a entrada de gás natural na cabotagem. Essas variantes de entrada do Gás Natural permitem identificar limites superiores e inferiores para a penetração de gás natural como combustível na cabotagem brasileira. O último passo é a estimativa de custos para comparar as duas estratégias de motorização, denominadas: "Estratégia GNL"e "Estratégia Bunker".

3.7.2 Cenário Limite Superior

Conforme apresentadas no Capítulo 2, as Figura 2.2, Figura 2.3 e Figura 2.4 mostram a evolução da carga no período entre 2010 e 2018. O crescimento definido no cenário de alta é a regressão linear dos últimos 3 anos da série (2016 a 2018). Conforme os dados apresentados em Subseção 2.2.6, a cabotagem cresceu mais no período 2016-2018 do que a média histórica. Notícias associam esse maior crescimento à mudança de modal na matriz de transporte brasileira [48].

Petroleiros

A taxa de crescimento média até 2030 é igual a 1,9% ao ano,

Tabela 3.14: Regressão Linear Petroleiros

Ano	Carga Transportada (t)
2016	116941248
2017	117910406
2018	122227343
2019	124312428
2020	126955476
2021	129598524
2022	132241572
2023	134884620
2024	137527668
2025	140170716
2026	142813764
2027	145456812
2028	148099860
2029	150742908
2030	153385957

Fonte: Elaboração Própria

Graneleiros

A taxa de crescimento média até 2030 é igual a 6,68% ao ano.

Tabela 3.15: Regressão Linear Graneleiros

Ano	Carga Transportada (t)
2016	16854153
2017	21366623
2018	20422736
2019	23116421
2020	24900713
2021	26685004
2022	28469296
2023	30253588
2024	32037880
2025	33822171
2026	35606463
2027	37390755
2028	39175047
2029	40959338
2030	42743630

Fonte: Elaboração Própria

Porta Contêineres

A taxa de crescimento média até 2030 é igual a 7,18% ao ano. A perda de espaço referente ao retrofit equivale a 10% da capacidade [49]. Portanto, há a necessidade de aumentar em 10% a velocidade para compensar esta perda de espaço.

Tabela 3.16: Regressão Linear Porta Contêineres

Ano	Carga Transportada (t)
2016	10582825
2017	11892505
2018	13507575
2019	14919052
2020	16381427
2021	17843803
2022	19306178
2023	20768553
2024	22230928
2025	23693303
2026	25155678
2027	26618054
2028	28080429
2029	29542804
2030	31005179

Fonte: Elaboração Própria

3.7.3 Cenário Limite Inferior

Para o cenário inferior, é atribuído o menor valor de crescimento anual nos anos da série (2016-2018).

Petroleiros

Para os petroleiros, a taxa de crescimento no cenário de baixa é a menor variação positiva entre os anos de 2016 a 2017, representando 0,8% (Tabela 3.17).

Tabela 3.17: Carga Granel Líquido e Gasoso

Ano	Carga Transportada (t)	Variação Anual (%)
2010	99865419	-
2011	104625567	4,7
2012	109857192	5,0
2013	111008719	1,1
2014	116272249	4,7
2015	117752385	1,3
2016	116941248	-0,7
2017	117910406	0,8
2018	122227343	3,7

Fonte: Elaboração Própria com dados de [7]

Graneleiros

Conforme a Tabela 3.18, o menor crescimento positivo na série histórica foi entre os anos de 2013 para 2014, igual a 0,1%. Portanto esse foi a valor utilizado para fazer a projeção da carga de granel sólido.

Tabela 3.18: Carga Granel Sólido

Ano	Carga Transportada (t)	Variação Anual (%)
2010	18256735	-
2011	21114444	15.7
2012	17204445	-18.5
2013	16567559	-3.7
2014	16585904	0.1
2015	16136917	-2.7
2016	16854153	4.4
2017	21366624	26.8
2018	20422737	-4.4

Fonte: Elaboração Própria com dados de [7]

Porta Contêineres

Para a carga conteinerizada, o valor de crescimento anual é definido pela variação entre 2016 e 2017, com uma taxa de 0,8% (Tabela 3.19).

Tabela 3.19: Carga Conteinerizada

Ano	Carga Transportada (t)	Variação Anual (%)
2010	5183683	-
2011	5621574	8.4
2012	7164379	27.4
2013	9093210	26.9
2014	9596939	5.5
2015	10326476	7.6
2016	10582826	2.5
2017	11892506	12.4
2018	13507576	13.6

Fonte: Elaboração Própria com dados de [7]

3.7.4 Cenário Superior de Gás Natural

Para o cenário superior de entrada do gás natural, é estabelecido que 100% das embarcações utilizará GNL como combustível até 2030[2]. A entrada se dá com um

[2]Posteriormente serão discutidos os desafios para consecução desta hipótese

crescimento gradativo linear do percentual de utilização de GNL como combustível a partir de 2020.

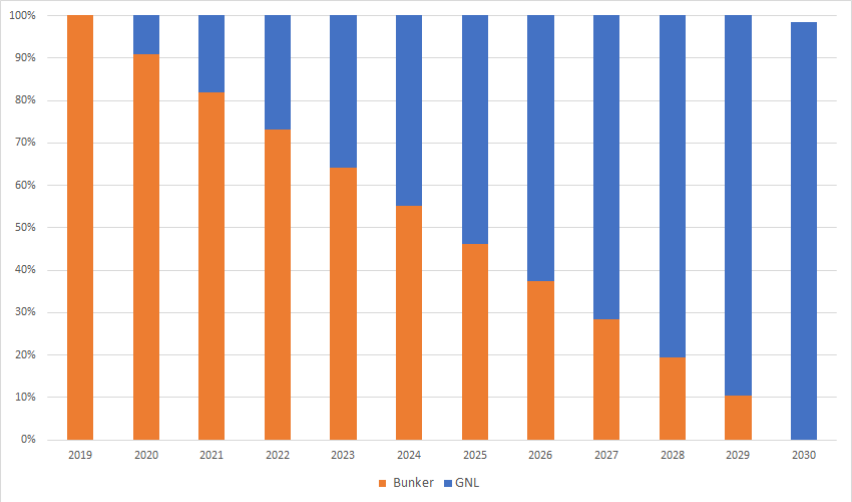

Figura 3.7: Cenário alta GNL share de combustíveis
Elaboração Própria

3.7.5 Cenário Inferior de Gás Natural

Para o cenário inferior de entrada de gás natural, utiliza-se a premissa conservadora que o GNL entrará apenas nas rotas de 2018 nos quais existem terminais importadores de GNL (Bahia de Guanabara, Suape e Pecém). Para isso, é utilizada a percentagem de carga transportada nessas rotas e definido que o GNL terá o máximo valor igual de carga transportada limitado por essa percentagem em 2030.

Petroleiros

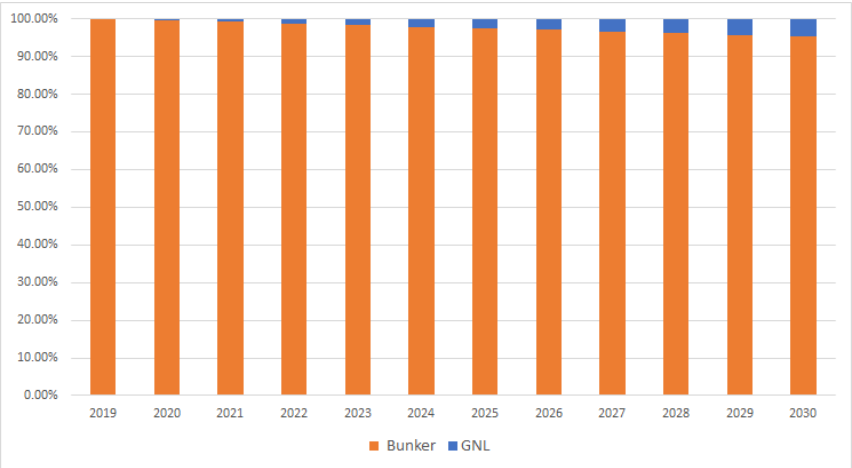

Figura 3.8: Cenário de baixa GNL share de combustíveis para petroleiros
Elaboração Própria

Tabela 3.20: Rotas Petroleiros Possíveis de Entrada de GNL

Origem	Destino	Carga Transportada
Rio de Janeiro	São Sebastião	913,993
Rio de Janeiro	Osório	518,268
Rio de Janeiro	Suape	472,689
Rio de Janeiro	Angra dos Reis	240,503
Suape	Fortaleza	874,719
Suape	Santos	474,353
Suape	Manaus	465,504
Suape	Madre de Deus	429,713
Suape	Terminais Fluviais do Brasil	384,660
Suape	Belém	250,275
Suape	São Sebastião	247,008
Suape	Paranaguá	226,597
Suape	Grumaré	225,016
Soma		5,723,299
Total 2018		118,723,584
Share		4,82%

Fonte: Elaboração Própria com dados de [7]

Porta Contêineres

Tabela 3.21: Rotas Petroleiros Possíveis de Entrada de GNL

Origem	Destino	Carga Transportada
Suape	Chibatão	312,515
Suape	Santos	289,578
Suape	Super Terminais	188,276
Suape	Itaguaí	144,515
Suape	Salvador	112,194
Pecém	Santos	218,868
Pecém	Chibatão	267,492
Soma		1,533,437
Total 2018		13,507,576
Share		11.35%

Fonte: Elaboração Própria com dados de [7]

3.7.6 Resumo dos Cenários

Portanto, a Figura 3.10 mostra os dois caminhos que são percorridos para a entrada de gás natural na cabotagem. visando não realizar uma projeção, mas sim identificar limites superior e inferior para a potencial utilização de gás natural como combustível da cabotagem em substituição ao bunker marítimo. O caminho superior de agora em diante será chamado de Limite Superior Superior ou LSS e o caminho

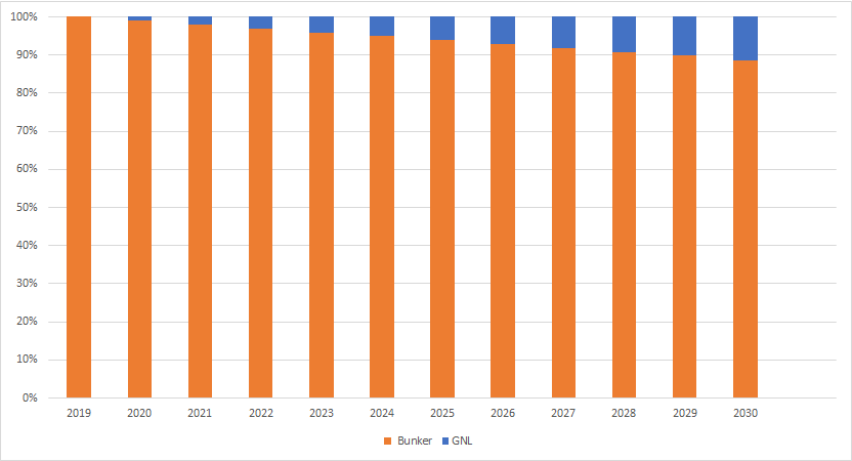

Figura 3.9: Cenário de baixa GNL share de combustíveis para porta contêineres
Elaboração Própria

inferior de Limite Inferior Inferior ou LII.

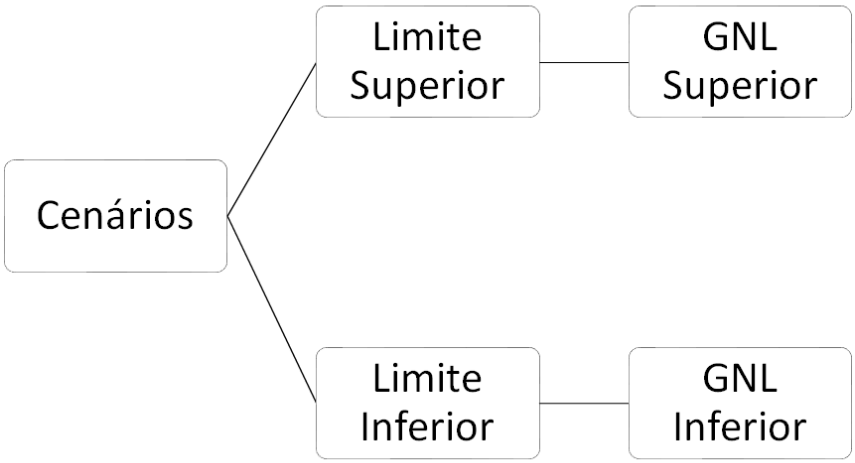

Figura 3.10: Cenários
Elaboração Própria

3.8 Custos das estratégia de GNL e de Bunker

Nesta seção é discutido os cálculos das duas estratégias de motorização.

3.8.1 Preços dos Combustíveis

GNL

Para a estimativa de preço do GNL, é proposto uma metodologia para igualar o valor presente líquido (VPL) das duas estratégias de motorização. É calculado o valor do VPL da estratégia Bunker para diferentes taxas de desconto e depois calculado o preço do GNL no qual o valor do VPL da estratégia GNL seja igual ao VPL da estratégia Bunker para cada taxa de desconto calculada.

Bunker

A projeção de preço é feita através do relatório da U.S. Energy Information Administration (EIA) [50] no qual é realizada uma projeção do preço do Brent até 2030. De acordo com a figura Figura 3.11, historicamente o preço do Bunker e do Brent tem uma forte correlação. A média, conforme a figura, é de prêmio de 110 $/tonelada do Santos VLSFO para o Brent [51].

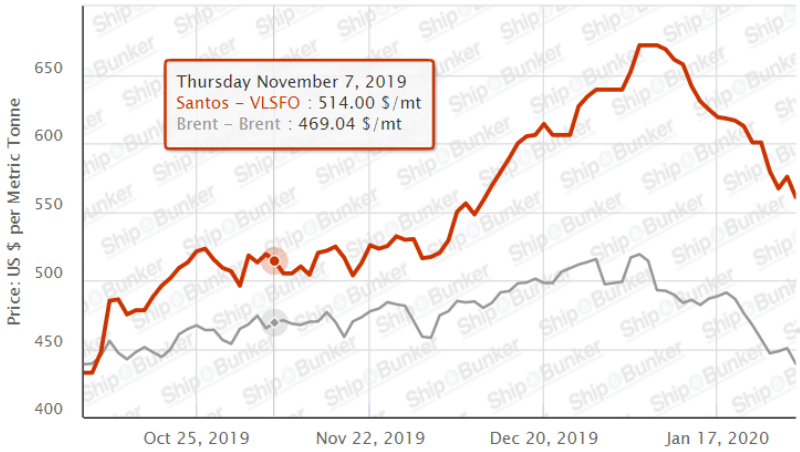

Figura 3.11: Preços Santos VLSFO e Brent
[21]

Tabela 3.22: Preço Brent e Santos VLSFO

Ano	Brent ($/Barril)	Brent ($/Tonelada)	VLSO Santos ($/Tonelada)
2020	73	537	648
2021	74	546	656
2022	74	546	656
2023	76	559	669
2024	79	581	692
2025	79	599	710
2026	81	622	733
2027	85	641	752
2028	88	655	766
2029	89	669	779
2030	91	682	792

Fonte: Elaboração Própria com dados de [50]

3.8.2 Infraestrutura de *bunkering*

Os custos de bunkering[3] são reportados na Tabela 3.23 em valores de dólar de 2018. O custo dessa infraestrutura é crucial para o cálculo dos custos das estratégias, visto que o GNL demandará uma infraestrutura diferente dos combustíveis convencionais. A Tabela 3.23 mostra o custo dos componentes e seus custos de operação. Os componentes destacados são: Gasoduto, Taxas do Terminal, Tanque de Estocagem, navio alimentador de GNL , caminhão e outros [52].

Tabela 3.23: Preço Infraestrutura de *bunkering*

Componente	Custo da Unidade (milhões $)	OPEX ($/ton)	Capacidade Anual Milhões de Toneladas por Ano
Gasoduto	0,6	0,1	0,90
Taxas do Terminal	N/A	2,48	N/A
Tanque de Estocagem (50.000 m^3)	120	18,7	0,91
Tanque de Estocagem (700 m^3)	9	0,2	0,01
Navio alimentador de GNL	60,7	2,7	1,84
Caminhão alimentador	0,22	0,04	0,04
Outros Custos	40,8	0,4	0,09

Fonte: Elaboração Própria com dados de [52]

Os custos do gasoduto incluem os custos operacionais anuais médios de um gasoduto de 1 km (estimado o comprimento médio do gasoduto desde o grande terminal de GNL até o cais de abastecimento de GNL) com base na provável construção dessas instalações nos terminais de importação de GNL do Norte da Europa (Zeebrugge, Roterdã). Os custos do gasoduto também incluem os custos das conexões

[3]O termo bunkering significa o abastecimento do navio por algum combustível. O termo se originou na época dos navios a vapor, quando o combustível, o carvão, era armazenado em bunkers.

do coletor.

Os navios alimentadores de GNL, assumidos como o principal modo de abastecimento, podem variar de tamanho de 700 m^3 a 10.000 m^3. Essa análise pressupõe que os volumes de navios-bunker para abastecimento marítimo tenderão ao final mais alto da escala devido às expectativas de maior demanda marítima de GNL no futuro. No entanto, o tamanho dos tanques e embarcações de armazenamento é ajustado para refletir a evolução da demanda esperada diferentes cenários. Esta estimativa pressupõe que o investimento em infraestrutura de abastecimento envolve compromissos financeiros significativos para construir infraestrutura para uma transição de longo prazo para o GNL, em vez de enfatizar retornos financeiros de curto prazo.

Quanto aos navios alimentadores de GNL, espera-se que os terminais intermediários de GNL também sejam construídos no final da escala de maior capacidade (50.000 m^3), a fim de estarem disponíveis para uma possível demanda futura. Presume-se que sejam tanques estacionários de GNL em terra nas proximidades (dentro de 1 km) de portos onde o abastecimento de TTS pode ocorrer.

Outros custos incluem custos de construção de um cais de abastecimento, obras de engenharia no cais (iluminação, eletricidade), custos de supervisão e documentação, bem como o custo de solicitação de licença necessário, todos ajustados para o tamanho relativo da instalação em termos de capacidade anual de abastecimento de GNL.

Como não há dado de consumo locacional do GNL, o CAPEX do bunkering é determinado dividindo o custo de cada componente por sua capacidade anual, chegando ama unidade de milhões de dólares por tonelada de GNL. Então, é ocorrem duas etapas de investimento, uma em 2020 e a segunda em 2025. A entrada de 2020 é estimada usando o consumo de GNL no ano de 2024 multiplicado pelo valor da divisão do custo do componente por sua capacidade anual. A entrada de 2025 é usando o consumo de 2030 menos o consumo de 2024.

3.8.3 Preços dos navios novos e Retrofit

Os preços de navios novos e retrofit de navios para motores 2 tempos a GNL estão exibidos na Tabela 3.24. Os valores estão expressão em dólares de 2012.

Tabela 3.24: Preço Retrofit e navios novos em dólares de 2012

Estratégia	Preço Retrofit ($/kW)	Preço navios novos ($/kW)
GNL 2-tempos dual fuel	700	1500
GNL 4-tempos dual fuel	800	1600
GNL 4-tempos centelhamento	800	1600

Fonte: Elaboração Própria com dados de [53]

Os valores têm de ser trazidos para o ano base da análise econômica. Como os dados utilizados neste estudo são de 2018, os valores da Tabela 3.24 estão expressos em dólares de 2018 na Tabela 3.25. Para essa transformação, é utilizado o *Consumer Price Index ou (CPI)* pois o CPI é mais frequentemente usado para fazer comparações no tempo, em parte porque é a série com a qual as pessoas estão mais familiarizadas nos EUA [54].

Tabela 3.25: Preço Retrofit e navios novos em dólares de 2018

Estratégia	Preço Retrofit ($/kW)	Preço navios novos ($/kW)
GNL 2-tempos dual fuel	766	1640
GNL 4-tempos dual fuel	875	1750
GNL 4-tempos centelhamento	875	1750

Fonte: Elaboração Própria

3.8.4 Evolução do número total de navios

A evolução da frota se deu conforme a evolução da carga apresentada na Subseção 4.2.1 onde foram indicadas as projeções das cargas segundo as premissas do Cenário Limite Superior. Para atender esta demanda crescente de carga transportada são definidas as seguintes premissas para evolução da frota:

- Navio sempre carregando 100% da capacidade;
- Tempo de Vida útil de 20 anos [55];
- Retrofit aos 10 anos para navios existentes. Não existe um valor exato para definir quando será feito o retrofit, porém utilizando 10 anos garante-se que todos os navios sofrerão retrofit no período analisado;
- Navio de entrada de porte igual à moda da frota atual.

Tabela 3.26: Entrada de Navios e Retrofit para petroleiros

Ano	Carga Transportada (t)	Frota Total	Novos	Retrofit
2018	122227343	35	-	-
2019	124312428	36	11	0
2020	126955476	37	1	0
2021	129598524	38	1	1
2022	132241572	39	1	3
2023	134884620	40	1	1
2024	137527668	41	1	3
2025	140170716	42	1	5
2026	142813764	43	1	1
2027	145456812	44	3	2
2028	148099860	45	1	3
2029	150742908	46	2	1
2030	153385957	47	1	0

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 3.27: Entrada de Navios e Retrofit para Graneleiros

Ano	Carga Transportada (t)	Frota Total	Novos	Retrofit
2018	20422736	9	-	-
2019	23116421	10	4	0
2020	24900713	11	1	0
2021	26685004	12	1	1
2022	28469296	13	1	3
2023	30253588	14	1	1
2024	32037880	15	1	0
2025	33822171	16	1	1
2026	35606463	17	1	0
2027	37390755	18	1	0
2028	39175047	19	1	0
2029	40959338	20	1	0
2030	42743630	21	1	0

Fonte: Elaboração Própria

3.8.5 Equações para os custos

As Equação 3.16 e Equação 3.17 demonstram como é feito o cálculo para cada ano para as duas estratégias de penetração de gás natural. Nesta análise, o fluxo de caixa é trazido a valor presente líquido (VPL) conforme as taxas previamente definidas e a Equação 3.18.

Tabela 3.28: Entrada de Navios e Retrofit para Porta Contêineres

Ano	Carga Transportada (t)	Frota Total	Novos	Retrofit
2018	13507575	17	-	-
2019	14919052	19	2	3
2020	16381427	21	2	0
2021	17843803	23	2	1
2022	19306178	25	2	1
2023	20768553	27	2	3
2024	22230928	29	2	2
2025	23693303	31	2	1
2026	25155678	33	2	0
2027	26618054	35	2	1
2028	28080429	37	2	0
2029	29542804	39	2	0
2030	31005179	41	2	0

Fonte: Elaboração Própria

GNL

$$Custos = m_{\text{GNL}} P_{\text{GNL}} + m_{\text{Bunker}} P_{\text{Bunker}} + N_{\text{Novos}} P_{\text{Novos}} + N_{\text{Retrofit}} P_{\text{Retrofit}} + \quad (3.16)$$

$$+ CAPEX_{bunkering} + OPEX_{bunkering}$$

Bunker

$$Custos = m_{\text{Bunker}} P_{\text{Bunker}} + N_{\text{Novos}} P_{\text{Novos}} \quad (3.17)$$

VPL

$$VPL = \sum_{n=0}^{n} \frac{Custo\ anual}{(1+i)^n} \quad (3.18)$$

onde i é a taxa de desconto e n é o ano.

Após encontrar o VPL para a estratégia Bunker, calcula-se o preço médio do combustível GNL para o período no qual os VPL das duas estrategia se equivalem variando a taxa de desconto para 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0%. O último passo é comparar os preços calculados do GNL com o preço médio de importação do GNL.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo, apresentam-se os principais resultados da modelagem proposta no Capítulo 3.

A Seção 4.1, mostra a estimativa de consumo de combustível no período entre 2011 e 2018 para a 3 diferentes classes de embarcações.

A projeção de consumo para 2030 é apresentada na Seção 4.2. As projeções do cenário "Limite Superior"e "Limite Inferior são mostradas na Subseção 4.2.1 e na Subseção 4.2.2 respectivamente. Os cenários de penetração de gás natural estão representados na Subseção 4.2.4 e na Subseção 4.2.5. Finalizando a seção de projeção de consumo, a Subseção 4.2.6 mostra a comparação entre os cenários de gás natural e discute-se o tamanho do mercado de gás natural que a cabotagem poderia ter no Brasil.

Os custos das estratégias de motorização "GNL"e "Bunker"são introduzidos na Seção 4.3 e é discutido o preço do GNL no qual a estratégia GNL passa a ser competitiva.

E, por último, na Seção 4.4 faz se a discussão das maneiras de se atingir o limite estimado de gás natural no Brasil, como, por exemplo, políticas públicas.

4.1 Consumo Histórico de Bunker

4.1.1 Consumo Petroleiros

A Figura 4.1 mostra a evolução do consumo dos petroleiros entre 2011 e 2018. Em 2011, o consumo estimado de combustível foi de 206094 toneladas, atingindo o 260929 toneladas em 2018. Isto representa um aumento de 27% de combustível. A correlação entre a carga transportada (Figura 2.2) e o consumo de combustível é de 68%. Dois fatores podem ter influenciado para diminuir a correlação: a agregação de algumas rotas em um rota chamada Resto e a posição geográfica das rotas originadas de uma bacia sedimentar.

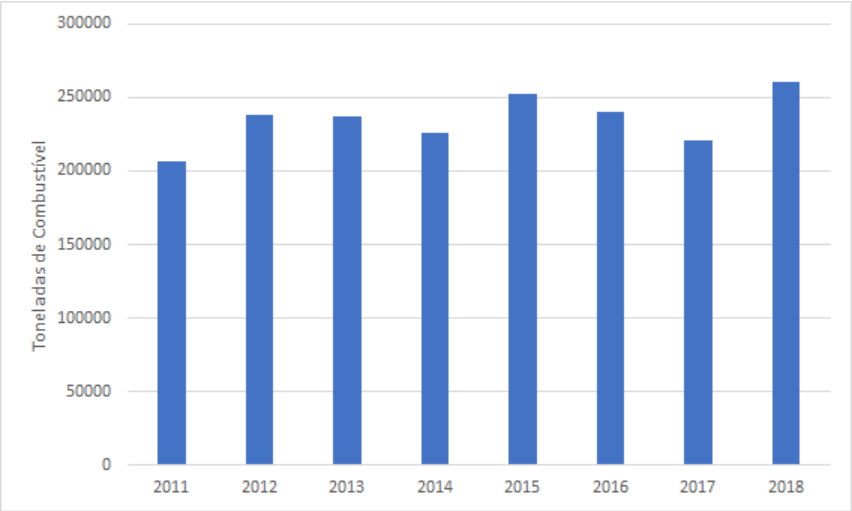

Figura 4.1: Consumo dos petroleiros entre 2011-2018
Elaboração Própria

4.1.2 Consumo Graneleiros

A Figura 4.2 mostra a evolução do consumo dos graneleiros no período. O comportamento da curva se assimila ao da carga transporta, com dois picos em 2011 e 2017 e estabilização entre 2012 e 2016. A correlação calculada entre a carga transporta (Figura 2.3) e o consumo de combustível é de 82%. Essa foi a correlação mais alta encontrada, devido a menor quantidade de rotas por esta classe de navios, tirando a necessidade de grande mudanças na metodologia.

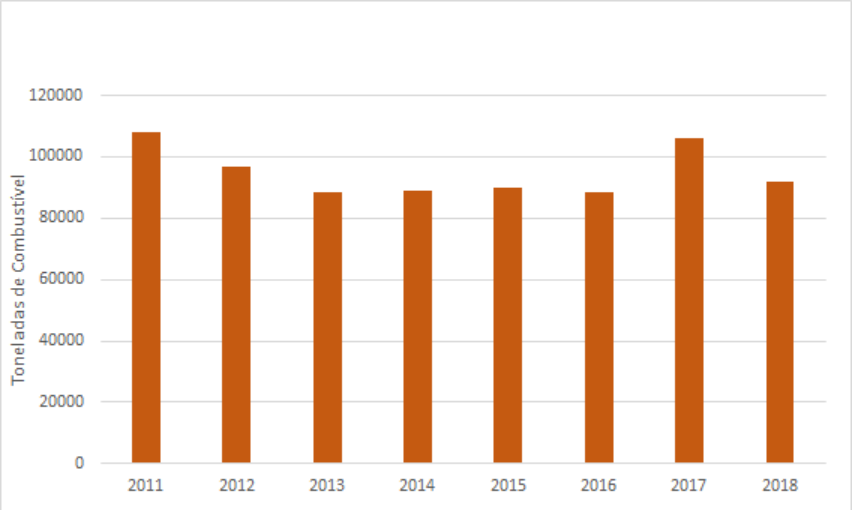

Figura 4.2: Consumo dos graneleiros entre 2011-2018
Elaboração Própria

4.1.3 Consumo Porta-Contêineres

Apesar do menor percentual de participação na carga transportada, a ordem de grandeza do consumo dos porta-contêineres é igual ao dos petroleiros. Esse resulta condiz com a literatura[1]. O consumo em 2011 foi de 229938 toneladas, aumentando para 345771 em 2018. Isto representa um crescimento de aproximadamente 50%, conforme a Figura 4.3. Já a correlação calculada é de 75%. A correlação está sendo afetada por alguns aspectos: a padronização de um porte de navio para todas as rotas, o agrupamento de vários portos em clusters, gerando imprecisões nas distâncias percorridas.

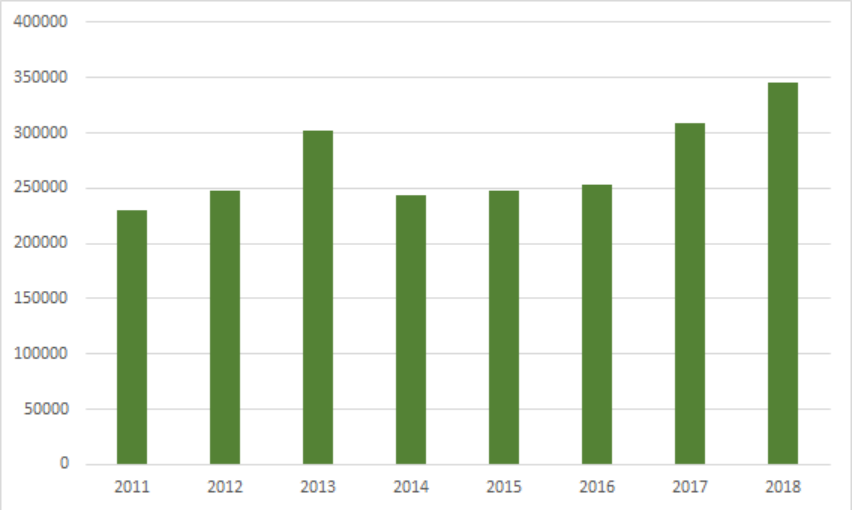

Figura 4.3: Consumo dos porta-contêineres entre 2011-2018
Elaboração Própria

4.1.4 Consumo Cabotagem Total

O resultado do consumo da cabotagem no Brasil pode ser visualizado na Figura 4.4. Nota-se a maior importância dos navios petroleiros e porta-contêineres. Em 2011, o consumo de combustível foi de 544304 toneladas e, em 2018, de 698524 toneladas, representando um aumento de 28%. A correlação calculada entre carga transportada e consumo foi de 75%.

[1]Conforme [53], os existem cerca de 25% a mais de navios petroleiros em relação a porta-contêineres, porém os porta-contêineres consoem 60% a mais de combustível.

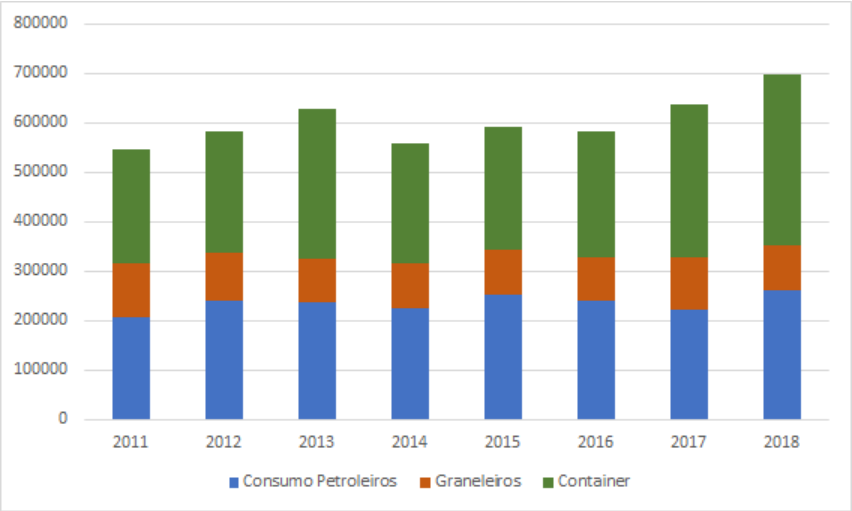

Figura 4.4: Consumo na cabotagem entre 2011-2018
Elaboração Própria

4.2 Projeção para 2030

4.2.1 Cenário Limite Superior

Tendo em vista as premissas de um crescimento forte para a cabotagem, o consumo cresce de 698.524 para 1.129.650 toneladas, um aumento de 62%. O crescimento pode ser visualizado na Figura 4.5. O aumento se deve, principalmente, à maior taxa de crescimento dos navios porta-contêiner. Pode-se entender com esse aumento um forte aumentado de participação cabotagem na matriz de transportes brasileiras, associada a maior transporte de bens industrializados no país.

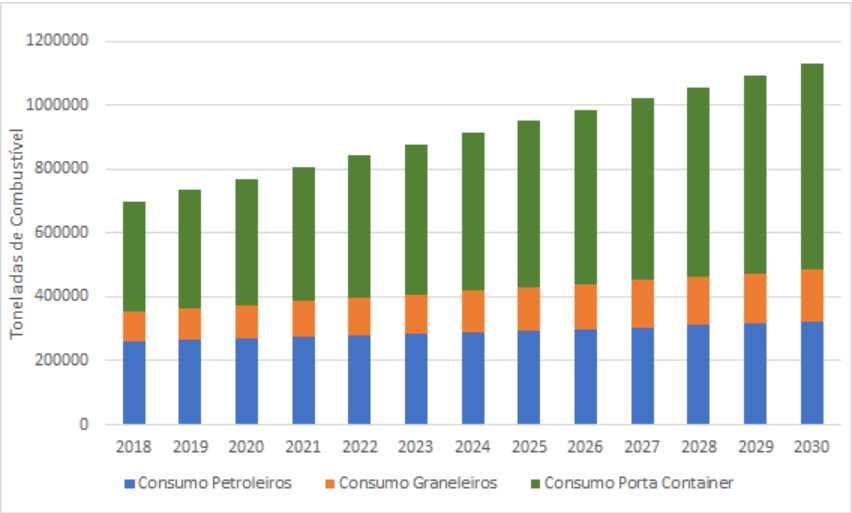

Figura 4.5: Projeção para o consumo de combustível em 2030 para o cenário Limite Superior

Elaboração Própria

4.2.2 Cenário Limite Inferior

Para cenário limite inferior, naturalmente, o crescimento é mais modesto do que o do cenário anterior, como esperado. O consumo de combustível cresce de 698.525 para 835.277 toneladas no período entre 2018-2030, um aumento de 20%. Este cenário representa a manutenção do *statu quo* da carga transportada da cabotagem em relação à matriz de transporte brasileira, associado também a um baixo crescimento do setor industrial brasileiro. Este cenário está representado na Figura 4.6.

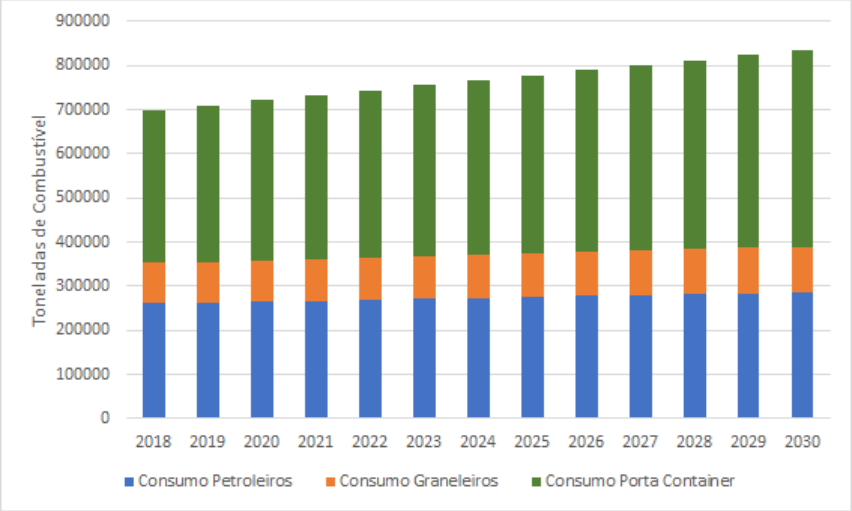

Figura 4.6: Projeção para o consumo de combustível em 2030 para o cenário Limite Inferior

Elaboração Própria

4.2.3 Resumo Cenários Superior e Inferior

A Figura 4.7 resume a trajetória percorrida pelos dois cenários.A trajetória da média história também é representada como uma medida comparativa. Estas projeções mostram os possíveis caminhos que podem ser tomados pela cabotagem no Brasil.

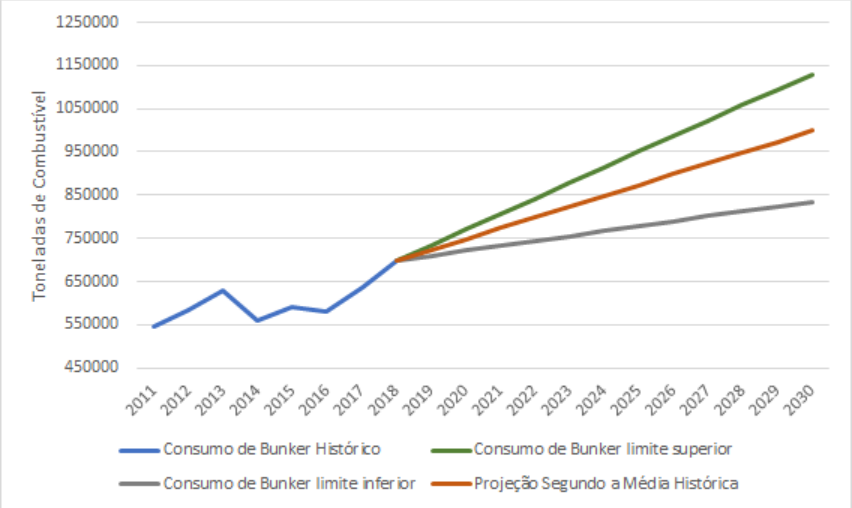

Figura 4.7: Resumo dos Cenários Superior e Inferior
Elaboração Própria

4.2.4 Gás Natural Superior

A Figura 4.8 mostra a trajetória de penetração do GNL na cabotagem se toda a frota for convertida até 2030, o que é possível tecnicamente, mas de difícil execução, como este trabalho destacará ainda. Como é de se esperar, o consumo de bunker vai quase a zero enquanto o consumo de GNL chega a 1.150.894 toneladas[2]. Existe um pequeno consumo de combustível piloto, correspondente a 1% do consumo de GNL em base energética.

[2]aproximadamente 4,8 milhões de m^3 nas CNTPs

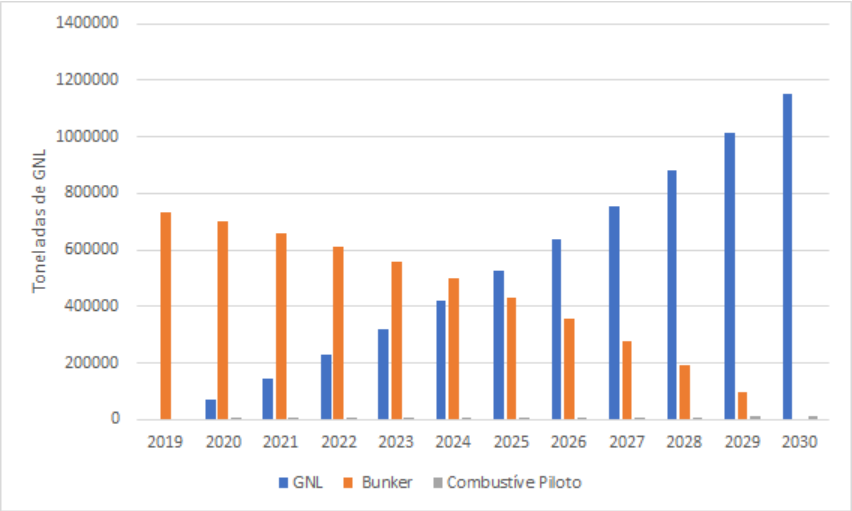

Figura 4.8: Projeção LSS do gás natural
Elaboração Própria

4.2.5 Gás Natural Inferior

A Figura 4.9 mostra a conversão de uma pequena parcela da frota para GNL até 2030. O consumo de bunker ainda continua predominante, saltando de 717.923 toneladas em 2019 para 865.771 toneladas em 2030. O GNL tem um baixo crescimento, como esperado, atingindo 56.180 toneladas[3]. O consumo de bunker como combustível piloto é praticamente desprezível neste cenário.

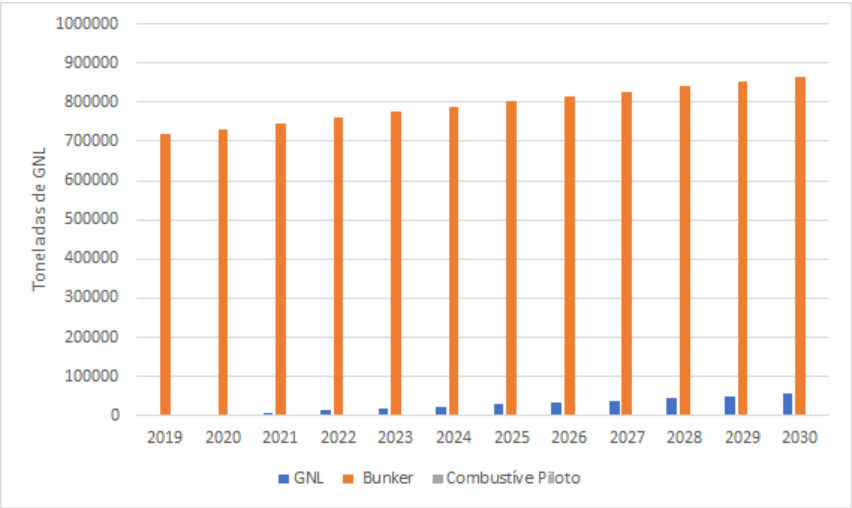

Figura 4.9: Projeção LII do gás natural
Elaboração Própria

[3]aproximadamente 0,4 milhões de m^3 nas CNTPs

4.2.6 Comparação dos Cenários

A Figura 4.10 compara em relação ao consumo em metros cúbicos de gás natural por dia. No cenário LSS, a penetração de gás natural atinge 4,8 milhões de m^3 por dia. Compratívamente, a cabotagem representaria o quarto setor que mais consumiria gás natural no Brasil, perdendo para o setor industrial (37,27 Mm^3/dia), Geração elétrica (27,21 Mm^3/dia) e automotivo (6,22 Mm^3/dia). Estaria a frente do setor residencial, comercial, cogeração e outros (incluindo GNC), 1,27, 0,91 , 2,73 e 0,90 Mm^3/dia, respectivamente conforme dados do Boletim mensal de acompanhamento da indústria de gás natural de outubro de 2019 [28]. Em comparação, a cabotagem consumiria o equivalente a soma das indústrias de mineração e pelotização, alimentos e bebidas e têxtil segundo o Balanço Energético Brasileiro publicado em 2019 [56].

Em relação à produção nacional, a cabotagem representaria 12% do que foi reinjetado e 106% da queima e perdas em 2019 [28]. Comparando com a importação de gás natural, o consumo é equivalente à 28% das importações da Bolívia e 53% das importações de GNL em 2019 [28]. Portanto, o total das importações de GNL em 2019 supriria completamente a demanda de GNL dos navios na cabotagem.

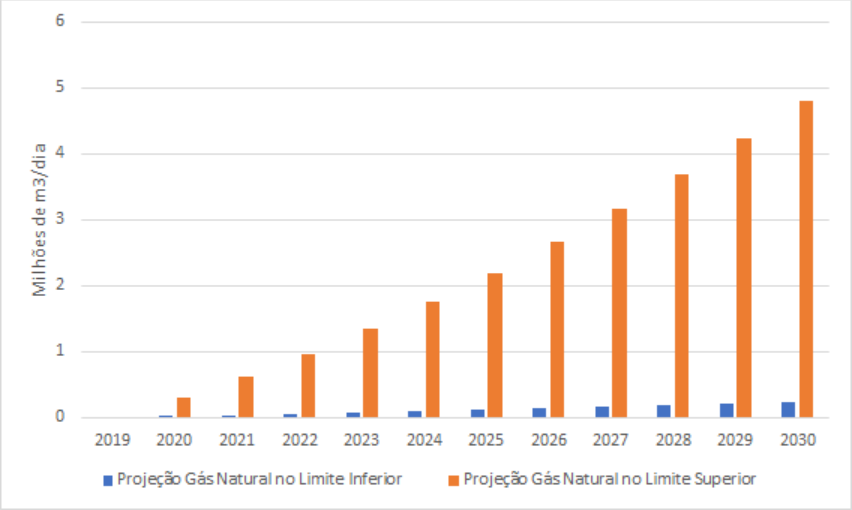

Figura 4.10: Comparação dos cenário de penetração do gás natural milhões de m^3/dia

Elaboração Própria

4.3 Custos

A partir desta seção, são mostrados os resultados obtidos referentes às duas estratégias de motorização. Os custos são referente aos resultados de consumo de combustíveis obtidos da projeção Limite Superior (Subseção 4.2.1) para a estratégia Bunker e da projeção Gás Natural Superior (Subseção 4.2.4) para a estrategia GNL.

4.3.1 Estratégia Bunker

Custo do Combustível

O custo do combustível VLSFO segue a projeção introduzida no capítulo anterior. A Tabela 4.1 mostra a evolução dos custos com combustível no período analisado.

Tabela 4.1: Custo dos Combustíveis da estratégia Bunker em MUS$$_{2018}$$

Ano	VLSFO
2020	452
2021	476
2022	505
2023	529
2024	564
2025	608
2026	649
2027	741
2028	783
2029	824
2030	866

Fonte: Elaboração Própria com base na projeção de [50]

Custo dos Navios Novos

Conforme a Tabela 4.2, os maiores custos estão no primeiro ano. Isso mostra, principalmente para os petroleiros, a idade envelhecida da frota conforme os dados das Tabela 2.3, Tabela 2.5 e Tabela 2.8. Após o primeiro ano, as entradas de navios se dão, predominantemente, com aumento da carga transporta.

Tabela 4.2: Custo dos Navios Novos (CAPEX) em MUS$$_{2018}$$

Ano	Petroleiro	Graneleiros	Porta-Contêiner
2020	220	46	131
2021	18	9	66
2022	18	9	66
2023	18	9	66
2024	18	9	66
2025	18	9	66
2026	18	9	66
2027	55	9	66
2028	18	9	66
2029	37	9	66
2030	18	9	66

Fonte: Elaboração Própria

Fluxo de Caixa e VPL

O fluxo de caixa pode ser visualizado na Tabela 4.3. Os valores, em milhões de dólares, foram trazidos a valor presente a dólar de 2018 com sua respectivas taxas de desconto. Esses valores podem ser visualizado na Tabela 4.4 A partir desses valores, o preço do GNL da estratégia GNL pode ser calculado.

Tabela 4.3: Custos Anuais em MUS$$_{2018}$$

Ano	Custo
2020	873
2021	599
2022	622
2023	657
2024	701
2025	742
2026	789
2027	871
2028	876
2029	936
2030	959

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 4.4: VPL em MUS$$_{2018}$$ conforme a taxa de desconto (% ao ano)

Taxa de Desconto (% ao ano)	VPL
1,0	8181
2,5	7581
5,0	6725
7,5	6019
10,0	5432

Fonte: Elaboração Própria

4.3.2 Estratégia GNL

O custo do VLSFO diminui no período devido à redução do consumo desse tipo de combustível. Ainda existe uma pequena parcela no final devido ao consumo de combustível piloto pelos motores dual conforme pode ser visualizado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Custo dos Combustíveis em MUS$$_{2018}$$

Ano	VLSFO
2020	454
2021	434
2022	403
2023	376
2024	348
2025	310
2026	267
2027	215
2028	154
2029	85
2030	9

Fonte: Elaboração Própria

Custo do Retrofit e dos Navios Novos

Os valores dos navios a GNL é um pouco superiores aos navios a bunker, como pode ser verificado comparando a Tabela 4.6 e Tabela 4.2. Com 10 anos estipulado para fazer o retrofit, todos os navios existentes a bunker também serão modificados para motores dual no período analisado conforme a Tabela 4.7.

Tabela 4.6: Custo dos Navios Novos GNL (CAPEX) em MUS$$_{2018}$$

Ano	Petroleiro	Graneleiros	Porta-Contêiner
2020	276	57	164
2021	23	11	82
2022	23	11	82
2023	23	11	82
2024	23	11	82
2025	23	11	82
2026	23	11	82
2027	69	11	82
2028	23	11	82
2029	26	11	82
2030	23	11	82

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 4.7: Custo do Retrofit para GNL MUS$$_{2018}$$

Ano	Petroleiro	Graneleiros	Porta-Contêiner
2020	0	0	57
2021	11	5	19
2022	32	16	19
2023	11	5	57
2024	32	0	38
2025	54	5	19
2026	11	0	0
2027	21	0	19
2028	32	0	0
2029	11	0	0
2030	0	0	0

Fonte: Elaboração Própria

Custo Bunkering CAPEX E OPEX

O custo de CAPEX da infraestrutura de abastecimento de GNL (*bunkering)* está mostrado na Tabela 4.8. Conforme a metodologia, o custo foi anualizada em 2 períodos distintos (2020-2024 e 2025-2030) e a maior utilização no final do período demostra os maiores investimentos necessários no segundo período. O custo também foi separado para as 5 diferentes taxas de descontos analisadas.

Tabela 4.8: CAPEX do *bunkering* conforme a taxa de desconto em MUS$$_{2018}$$

Ano	VLSFO
2020	469
2021	0
2022	0
2023	0
2024	0
2025	816
2026	0
2027	0
2028	0
2029	0
2030	0

Fonte: Elaboração Própria

O custo do OPEX do *bunkering* varia conforme a demanda apenas. Quanto mais navios abastecidos a GNL abastecido, maior o custo no ano. Devido à penetração linear assumida neste estudo, o custo também se comporta de maneira linear, conforme a Tabela 4.9.

Tabela 4.9: OPEX do Bunkering em MUS$$_{2018}$$

Ano	OPEX
2020	2
2021	4
2022	6
2023	8
2024	10
2025	13
2026	16
2027	19
2028	22
2029	25
2030	28

Fonte: Elaboração Própria

4.3.3 Preço do GNL para cada taxa de desconto

Por fim, depois de calculado todas as entradas do fluxo de caixa da estratégia GNL, é possível calcular o preço de *breakeven* para esta estratégia. Conforme cada taxa de desconto utilizada, os resultados podem ser visualizados na Tabela 4.10. A Figura 4.11 mostra que, para taxas de desconto menores, a estratégia GNL aceita preços de GNL mais altos para ser competitiva. Para taxa de desconto maiores, o preço do GNL necessita ser menor para a estratégia GNL ser competitiva. Portanto, para valores abaixo da curva, a estratégia GNL é mais vantajosa. Para valores acima, a estratégia Bunker é mais competitiva.

Tabela 4.10: Preço do GNL conforme a taxa de desconto

Taxa de Desconto (% ao ano)	Preço do GNL ($/t)
1,0	299
2,5	278
5,0	240
7,5	200
10,0	158

Fonte: Elaboração Própria

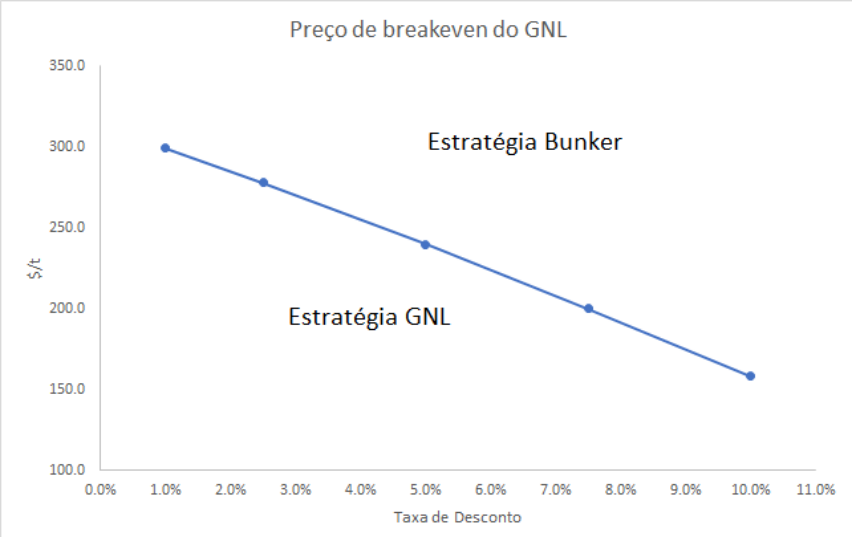

Figura 4.11: Preço do GNL conforme a taxa de desconto
Elaboração Própria

Para confrontar com os preços do GNL observados nos últimos ano, a Figura 4.12 compara o preço registrado entre 2015 e 2019 (linha contínua) com os preços calculados neste trabalho para as diferentes taxas de desconto (linhas tracejadas). Nota-se que o preço observado do GNL, no Brasil, cuja origem é importação com base spot não seria o suficiente para a penetração para as taxas de descontos utilizadas neste estudo.

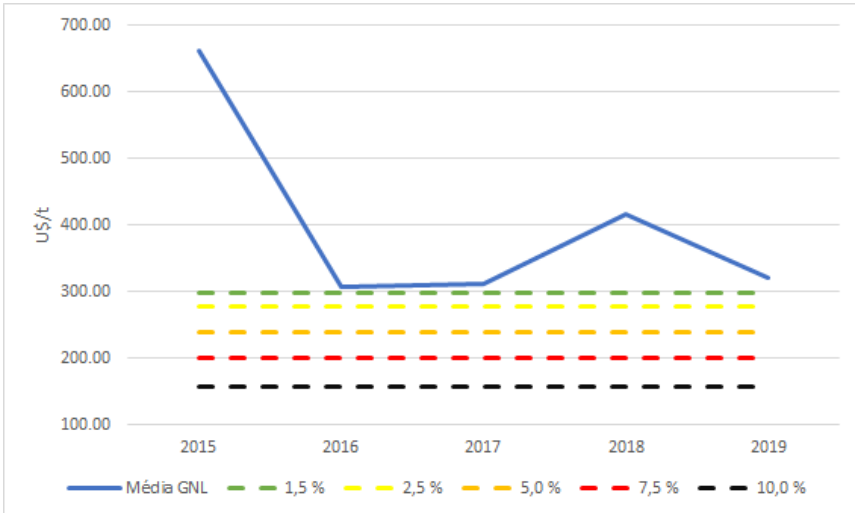

Figura 4.12: Preço observado do GNL e preços calculados para cada taxa de desconto
Elaboração Própria

O preço de importação do GNL em base spot representa o preço máximo (custo de oportunidade) para o preço do GNL nacional. Não há estudos sobre o possível preço de GNL nacional. Portanto, se o preço de GNL nacional for mais baixo que o preço spot de GNL, a estratégia do GNL pode ser viável. Se o preço do GNL nacional for mais caro que o preço spot observado, a cadeia de GNL dificilmente será implementada no Brasil.

4.4 Estratégias para expensão do GNL

Esta seção discorrerá sobre propostas para expansão do GNL no Brasil. Como visto, a implementação da estratégia de alta penetração de GNL custará na faixa de 6 a 10 bilhões de dólares conforme a variação da taxa de desconto utilizada neste estudo.

Um dos principais gargalos atualmente para o gás natural é a falta de capacidade de escoamento das bacias sedimentares para a costa. Parte da reinjeção acontece devido a esse deficit no escoamento. Portanto, parte da solução é finalizar os estudos das novas rotas de escoamento e terminar as obras já começadas. A penetração forte de GNL na cabotagem representaria um mercado cativo para o gás natural, diminuindo os riscos econômicos associados na construção dessas novas rotas de escoamento.

Ao chegar no porto, é necessário que tenha toda uma infraestrutura de recebimento do gás natural, que passa por uma planta de liquefação a um complexo industrial. Os investimentos em liquefação requerem aportes de capital inicial e longos tempos para o *payback* [57].Devido à relativa complexidade dos projetos, será necessária mão de obra qualificada para implementação desses projetos. Em Setem-

bro de 2019, por exemplo, o governo japonês, junto com o setor privado japonês, indicou investimentos de 10 bilhões de dólares para o desenvolvimento e treinamento de pessoa na cadeia do GNL globalmente [58]. Isto mostra a importância que o tema está sendo discutido e alta quantidade de capital que será injetada neste mercado. A falta de implementação de projetos de liquefação no Brasil faz-se necessário a busca por investimentos estrangeiros no país para captação e qualificação profissional e adquirir *know how* em projetos de liquefação.

A formação de *clusters* industriais em áreas de porto indicaria um aumento de demanda por energia. Atraindo empresas que utilizam gás natural como matéria prima, como, indústria químicas, siderúrgicas e termoelétricas a gás natural, criaria um complexo industrial cuja implementação dividira o risco associados aos investimentos na infraestrutura de gás natural e geraria uma demanda firme pelo recurso.

Em relação à regulação da cabotagem, alguns aspectos podem ser modificados de maneira a incentivar a cabotagem brasileira (Lei Número 9.432, de 8 de Janeiro de 1997) [59]. O primeiro ponto é referente a obrigatoriedade de dois terços da tripulação ser brasileira. Reduzir esse número pode diminuir o preço de frete da mercadoria. O segundo ponto é facilitar a contratação de uma embarcação com bandeira estrangeira se for movida a GNL. Essa medida visa à desburocratização do setor. O terceiro ponto é reduzir a taxa da Marinha Mercante que, atualmente, é de 10% se o navio for movido a GNL. Essa taxa aumenta diretamente o preço do frete. O quarto ponto é o preço cobrado pelo combustível. Como se trata de um novo combustível marítimo, poderia existir uma isenção de impostos por um tempo pré determinado de maneira a estimular o desenvolvimento de navios a GNL no Brasil. O preço calculado neste capítulo para a estratégia GNL, independentemente da taxa de desconto, foi mais alto do que o preço de importação médio do GNL nos últimos anos. Criar mecanismo, além de isenções de impostos para reduzir o preço do GNL é essencial para a introdução do combustível na cabotagem.

A infraestrutura portuária atual no Brasil é considerada deficitária no ponto de vista de acessos terrestres, falta de manutenção de canais e berços de atracação [60]. A prioridade para atracação de navios de longa distância é um gargalo a ser combatido pela cabotagem. A sugestão é criar janelas para atracação de navios de cabotagem de maneira a criar previsibilidade para rotas e diminuir os tempo de espera e operação.

Por fim, existem os investimentos para fazer o *retrofit* em navios. Do ponto de vista da empresa proprietária da embarcação, ela possui algumas possibilidades para reduzir as emissões de enxofre, entre elas: utilização de combustíveis com baixo teor de enxofre, instalação de *scrubbers* ou *retrofit* para motores dual. De maneira que o *retrofit* para motor dual seja a estratégia vencedora, é necessária a disponibilidade de GNL nas rotas no Brasil. Depois é necessário que haja o crédito proveniente

de uma parceria público-privada, com o governo oferendo vantagens regulatórias e isenções de impostos e setor privado entrando com o capital. No Brasil, já existem sediadas empresas que já realizaram *retrofit* em navios ao redor do mundo.

Para incentivar o uso de GNL na costa, poderia-se criar uma área de controle de emissões de enxofre (do inglês *Sulphur Emissions Control Area (SECA))*, conforme os moldes adotados na costa americana (incluindo Havaí e Porto Rico) e do mares báltico e nórdico. Nessas áres existem limitações de emissões de NOx , SOx e particulados. As emissões de SOx podem ser, no máximo, de 0,5% das emissões do navio.

A troca de combustíveis na cabotagem gera impactos positivos para o Brasil como um todo. A primeira vantagem é referente à segurança energética. Com o uso do GNL, existiria mais um importante vetor energético na matriz energética brasileira, além de aproveitar um recurso que é extraído junto com o óleo bruto e tem sido não aproveita atualmente [61]. Este aproveitamento do gás associado reduzirá a importação a importação de diesel e gasóleo pesado. O primeiro devido, sobretudo, à substituição do transporte rodoviário de carga pela cabotagem e o segundo, pela redução do uso do bunker de petróleo. O segundo aspecto é o fortalecimento da indústria nacional, visto que o desenvolvimento da cadeia do gás natural e do GNL resultaria na disponibilidade maior de combustível de menor preço usualmente, aumentando a competitividade das industrias. A criação de um mercado cativo de aproximadamente 5 Mm^3/dia permitiria a amortização de investimentos em UPGNs e no escoamento do gás natural até a costa. O terceiro ponto remete à poluição local nos portos. O GNL possui menores fatores de emissões de enxofre e particulados, principalmente, quando comparado ao bunker.

Investir na cabotagem para que ela tenha maior participação na matriz de transporte reflete ainda em alguns co-benefícios. A primeira, em aspecto global, diminuiria o total de emissões de gases de efeito estufa (GEE), visto que, para a mesma carga transportada, as emissões de GEE pela cabotagem representam 5 vezes menos se comparadas ao modal rodoviário [6]. O segundo é a diminuição do número de acidentes rodoviário. Em 20% dos acidentes rodoviários há presença de caminhões [62]. A mudança de modal poderia evitar cerca de 10 mil acidentes por ano [63]. Por outro lado, a mudança de modal poderá sofrer resistência por parte do setor rodoviário de carga. No Brasil existem cerca de 147 mil empresas transportadoras de cargas, 332 cooperativas e 492 mil motoristas autônomos regularizados [64]. Conforme foi verificado durante a greve dos caminhoneiros em 2018, a classe é capaz de paralisar o país e fazer demandas ao governo federal, portanto poderia ser um foco de resistência para a transição de modal .

Capítulo 5

Considerações Finais

5.1 Principais Conclusões

Esta dissertação teve como objetivo avaliar as perspectivas de uso do gás natural na cabotagem brasileira. Para tanto, foi realizada uma revisão teórica no Capítulo 2, seguida por análise específica de consumos de combustíveis de navios petroleiros, graneleiros e porta-contêineres, baseada na estimativa de consumo no período 2011-2018 e na construção de cenários (Capítulo 3 e Capítulo 4).

O Capítulo 2 focou na contextualização da cabotagem no país, levantando dados da carga transportada, frota e portos. Em seguida descreveram-se combustíveis marítimos, os combustíveis tradicionais e o GNL, com suas diferenças em termos de propriedades físico-químicas, estrutura de abastecimento e motorização do navio que requerem. Ainda no capítulo, foi introduzido o atual mercado de gás natural no Brasil, com dados de produção e oferta de gás.

Após a caracterização do problema, passou-se ao terceiro capítulo cujo foco era quantificar o consumo de bunker no período e a projeção para penetração de GNL.

Deste modo, o Capítulo 3 apresentou o modelo *bottom-up* desenvolvido para estimativa do consumo de bunker no Brasil entre 2011 e 2018 e os possíveis cenários de penetração de gás natural na cabotagem em 2030. Para tal foi necessária a separação dos navios porta-contêineres dos graneleiros e petroleiros devido à diferença logísticas das classes.

O primeiro passo para os petroleiros e graneleiros foi determinar as principais rotas e a quantidade de viagens por rota. O segundo passo foi determinar um navio típico para cada porte. Para tal, foram utilizadas equações de regressões lineares descritas na literatura para diferentes portes de navio. O terceiro passou foi determinar a velocidade típica para cada porte de navio.

Para os porta-contêineres, o primeiro passo foi definir clusters de portos para agregar a movimentação de contêineres. O segundo passo definiu o número de

viagens entre os clusters e o terceiro passo definiu a velocidade dos navios.

Após a definição das viagens, o coração da dissertação foi determinar, através de equações simplificadas de resistência ao avanço e de dados sobre eficiência e consumo específico, a estimativa de consumo de bunker pela cabotagem durante o período 2011-2018.

Em seguida, foram feitas duas cenarizações para projeção do consumo de bunker até 2030. A primeira, denominado Limite Superior, utilizou uma regressão linear da evolução da carga durante os 3 últimos anos do período histórico analisado (2016-2018). O segundo cenário, denominado Limite Inferior, utilizou a menor taxa de crescimento anual durante o período histórico analisado.

A partir de então, foram estipulados mais 2 cenários-limite para a penetração de GNL na cabotagem. O primeiro previu que toda a demanda de combustíveis em 2030 seria suprida pelo GNL e o segundo definiu que o GNL apenas poderia penetrar em rotas nas quais a origem possuísse um terminal de GNL. O objetivo do trabalho verificar uma faixa de mercado para GNL para a cabotagem, a partir de hipóteses otimistas e conservadoras.

Assim foram definidas duas estratégias de motorização, GNL e Bunker. As duas utilizam valores da projeção de 2030, a primeira do consumo de GNL, conforme o cenário LSS, e a segunda do consumo de Bunker,conforme o LS, para estimar o preço de breakeven do GNL.

No Capítulo 4, apresentam-se os principais resultados da aplicação da metodologia desenvolvida neste trabalho.

Primeiramente, mostram-se os resultados do consumo hatórico de bunker no período 2011-2018 por cada classe de navios. Os resultados quantitativos foram:

- os petroleiros aumentaram o consumo de 206.094 t em 2011 para 260.929 t em 2018;
- os graneleiros tiveram o pico em 2011, estabilização entre 2012 e 2016, crescimento em 2017 e redução em 2018;
- os porta-contêineres aumentaram o consumo de 229.938 t para 345.771 t em 2018;
- No geral, o consumo na cabotagem subiu de 544.304 t para 698.524 entre 2011 e 2018.

Em seguida, as duas projeções para 2030 tiveram os seguintes resultados:

- Limite Superior, há um aumento do consumo de bunker até atingir 1.129.650 t em 2030, aumentando 62% em relação ao valor de 2018;

- Limite Inferior, há um aumento de 20% em relação ao valor de 2018, atingindo 835.277 t em 2030.

A penetração, conforme os cenários de entrada de GNL, chegaram aos seguintes resultados:

- Cenário Gás Superior, o consumo de GNL em 2030 chega a 4,8 milhões de m^3/dia, o que representaria o quarto setor em consumo de gás natural no Brasil;
- Cenário Gás Inferior, o consumo de GNL em 2030 chega a 86.577 t.

Para definir o preço de *breakeven* do GNL, primeiramente foram calculados valores presentes líquido para a estratégia Bunker conforme as taxas de desconto iguais a 1,0%, 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0%. Os valores calculados, respectivamente, foram: 8.181, 7.581, 6.725, 6.019 e 5.432 milhões de dólares. Esses valores foram definidos também como os valores presente da estratégia GNL e para cada um, o preço do combustível GNL foi de 299, 278, 240, 200 e 158 dólares por tonelada de GNL. Estes preços, comparados com o preço médio de importação de GN, mostram a necessidade do GNL nacional ter um preço menor para que a estratégia GNL possa ser viabilizada.

Por fim, na última seção do capítulo foram feitas sugestões para que a estratégia GNL seja atinginda, discutindo investimentos, mudanças de regulações e possíveis co-benefícios.

5.2 Abrangência e utilidade

Conforme explicado ao longo da dissertação, este trabalho fornece uma contribuição metodológica para a estimativa de consumo para um determinado ano. A metodologia pode ser aplicada para qualquer data posterior a esse trabalho.

Este trabalho também fornece uma metodologia para estimar penetração de gás natural e os custos relacionados a essa penetração.

5.3 Limitações de metodologia

Cabe ainda ressaltar limitações da metodologia, listadas abaixo:

- As rotas foram definidas como um trajeto ida e volta, não necessariamente ocorrendo isso na realidade;

- As velocidades dos navios petroleiros e graneleiros foram pré definidas com valores encontrados na literatura e não necessariamente correspondem aos valores exatos percorridos;
- As velocidades dos navios porta-contêineres foram definidas por uma pequena amostra de navios por um curto período de tempo;
- É utilizada apenas um valor de velocidade ao longo da viagem;
- As rotas com menor transporte de cargas dos petroleiros foram agrupadas em um único grupo chamado Resto;
- Não houve ganho de eficiência de navios novos em relação à frota atual;
- Os valores de consumo específico não foram separados por tipo e tamanho de navio;
- Definiu-se apenas um navio característico por rota, desprezando a possibilidade de vários navios na mesma rota;
- Utilizou-se um modelo simplificado de avanço e resistência, desprezando diferenças de arquitetura entre os navios;
- Consideram-se apenas águas calmas;
- O consumo específico não variou conforme a carga;
- As eficiências do navios ficaram constantes independente da carga transportada;
- Foram desprezados portos para os porta-contêineres ao assumir clusters.
- A distância entre clusters foi definida pelo porto com maior quantidade de carga;
- Os tempos de atracação e desatracação foram escolhidos arbitrariamente por serem pouco relevantes para o consumo final da embarcação;
- A projeção para 2030 se deu considerando o consumo de caldeiras e sistemas auxiliares como combustível de propulsão, isto é, foi utilizado bunker em ambos;
- Os preços dos navios foram definidos conforme um único porte;
- A conversão total da frota para GNL não indicou possíveis problemas para a conversão;

- O volume de perda de espaço para petroleiros e graneleiros não foi considerado;
- O tempo no qual se aplica o retrofit foi escolhido sem uma referência bem definida;
- Não foram avaliados os custos da cadeia de GNL no Brasil;
- O custo do CAPEX foi simplificado ao dividir a o custo pela capacidade anual. Isto implica a falta de limite de capacidade para a infraestrutura;
- O tempo de vida de 20 foi retirada de uma média mundial e não necessariamente é o valor referente às embarcações brasileiras.

5.4 Sugestões para trabalhos futuros

Em relação a pesquisas futuras, recomendam-se os seguintes pontos:

- aplicação da metodologia para navios de carga geral;
- detalhamento de condições climáticas por rotas;
- estimativa de emissões de cada combustível;
- monetização das emissões de poluentes locais;
- avaliação das emissões evitadas com um aumento de participação da cabotagem na matriz de transportes;
- introdução da evolução da eficiência dos navios para cenários mais longos;
- Desenvolvimento de cenários para 2050;
- Introdução de outros combustíveis alternativos: amônia, hidrogênio ou biocombustíveis (por exemplo o bio-GNL);
- Calulo do preço do GNL numa cadeia nacional sobre a ótica do produtor;

Referências Bibliográficas

[1] SILVA, L. *Cabotagem : Vantagens e desvantagem , responsabilidade ambiental , desafios , infraestrutura.* Tese de Doutorado, Unaerp de Ribeirão Preto, 2012.

[2] IBGE. *Brazil em Números.* 47 ed. RIo de Janeiro, 2019.

[3] SCHAPS, K. "LNG-fuelled ship order book bulges". 2019. Disponível em: <https://www.petroleum-economist.com/articles/midstream-downstream/lng/2019/lng-fuelled-ship-order-book-bulges>.

[4] INTERTEK. "IMO 2020 Global Sulphur Cap". 2019. Disponível em: <https://www.intertek.com/marine/2020-sulphur-cap/>.

[5] SABINO, M. "Brasil reinjeta mais gás natural nos poços do que importa da Bolívia". 2019. Disponível em: <https://bit.ly/2Q5Iprm>.

[6] BNDES. "A Cabotagem no Brasil". 2018. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/cabotagem>.

[7] AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. "Anuário Estatístico Aquaviário". 2019. Disponível em: <http://web.antaq.gov.br/Anuario/>.

[8] LEWANDOWSKI, K. "Growth in the Size of Unit Loads and Shipping Containers from Antique to WWI", *Packaging Technology and Science*, 08 2016. doi: 10.1002/pts.2231.

[9] AQUAVIÁRIOS, A. N. D. T. "Frota - ANTAQ". 2019. Disponível em: <http://web.antaq.gov.br/Portal/Frota/ConsultarFrotaGeral.aspx>.

[10] SARACENI, P. P. *Transporte Marítimo de Petróleo e Derivados.* 2 ed. RIo de Janeiro, 2012.

[11] MAN DIESEL & TURBO. *Propulsion Trends in Tankers*. Relatório técnico, Copenhagen, 2013. Disponível em: <papers2://publication/uuid/E2231138-C89F-4814-BB59-307D249B99F2>.

[12] MAN DIESEL & TURBO. *Propulsion Trends in Bulk Carriers*. Relatório técnico, Copenhagen, 2013.

[13] MAN DIESEL & TURBO. *Propulsion Trends in Container Vessels*. Relatório técnico, Copenhagen, 2013.

[14] PETROBRAS. *Combustíveis Marítimos Informações Técnicas*. Relatório técnico, 2013.

[15] MARQUARD AND BAHLS. "Marquard & Bahls | Glossary". 2019. Disponível em: <https://www.marquard-bahls.com/en/news-info/glossary.html>.

[16] LEE, I., TAK, K., KWON, H., et al. "Design and Optimization of a Pure Refrigerant Cycle for Natural Gas Liquefaction with Subcooling", 2014. doi: 10.1021/ie403808y.

[17] DNV. *MARITIME GLOBAL SULPHUR CAP 2020*. Relatório técnico, 2019.

[18] ENGINEERING TOOLBOX. "Liquefied Natural Gas - LNG". 2019. Disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/liquefied-natural-gas-lng-d{_}1092.html>.

[19] EERE. "Alternative Fuels Data Center: Fuel Properties Comparison". 2019. Disponível em: <https://afdc.energy.gov/fuels/properties>.

[20] EPE. *Terminais de Regaseificação de GNL no Brasil Panorama dos Principais Projetos*. Relatório técnico, RIo de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://bit.ly/3cZrz7s>.

[21] SHIP & BUNKER. "Global Average Bunker Price Bunker Prices - Ship & Bunker". 2019. Disponível em: <https://shipandbunker.com/prices/av/global/av-glb-global-average-bunker-price>.

[22] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *BOLETIM MENSAL DE ACOMPANHAMENTO DA INDÚSTRIA DE GÁS NATURAL*. Relatório técnico, MME, 2019.

[23] EMSA. *Guidance on LNG Bunkering to Port Authorities and Administrations*. Relatório técnico, European Maritime Safety Agency, 2018.

[24] IMO. *Studies on the feasibility and use of LNG as a fuel for shipping.* Relatório técnico, international maritime organization, Londres, 2016. Disponível em: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/LNGStudy.pdf>.

[25] SHARAFIAN, A., BLOMERUS, P., MÉRIDA, W. "Natural gas as a ship fuel: Assessment of greenhouse gas and air pollutant reduction potential", *Energy Policy*, v. 131, n. x, pp. 332–346, 2019. ISSN: 03014215. doi: 10.1016/j.enpol.2019.05.015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.05.015>.

[26] FABER, J., NELISSEN, D., AHDOUR, S., et al. *Study on the Completion of an EU Framework on LNG-fuelled Ships and its Relevant Fuel Provision Infrastructure.* Relatório técnico, 2015.

[27] NORD, M. S. "Three design concepts for LNG fuel systems - Marine Service Noord". Disponível em: <https://marine-service-noord.com/three-design-concepts-for-lng-fuel-systems/>.

[28] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *BOLETIM MENSAL DE ACOMPANHAMENTO DA INDÚSTRIA DE GÁS NATURAL.* Relatório técnico, Brasília, 2019.

[29] SEAROUTES. "Distance calculator, weather routing & voyage planning". 2019. Disponível em: <https://searoutes.com/routing?speed=13{&}panama=true{&}suez=true{&}kiel=true{&}rivers=block{&}roads=block>.

[30] MAANUM, M. O., SELNES, H. P. *Determinants of Vessel Speed in the VLCC Market – Theory vs . Practice by.* Tese de Doutorado, NORGES HANDELSHØYSKOLE, 2015.

[31] ILOS. *Portos 2021: Avaliação de Demanda e Capacidade do Segmento Portuário de Contêineres no Brasil.* Relatório técnico, 2011.

[32] BIG OCEAN DATA. "Vessel tracking and fleet managment". 2019. Disponível em: <https://www.bigoceandata.com/>.

[33] CTB. "Principais Características dos Navios |". Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/projecto-de-defensas/principais-caracteristicas-dos-navios/>.

[34] KRISTENSEN, H. O. *Determination of regression formulas for main dimensions of tankers and bulk carriers based on IHS Fairplay data.* Relatório técnico, Technical University of Denmark, 2012. Disponível em: <www.shipowners.dk>.

[35] LUTZEN, M., KRISTENSEN, H. O. *Statistical Analysis and Determination of Regression Formulas for Main Dimensions of Container Ships Based on IHS Fairplay Data.* Relatório Técnico PN 2010-56, WP2, RN3, Technical University of Denmark, 2013. Disponível em: <http://www.skibstekniskselskab.dk/public/dokumenter/Skibsteknisk/Foraar2013/25.02.2013/WP2-Report3-Regressionanalysisforcontainerships-February2013.pdf>.

[36] CHAKRABORTY, S. "Understanding Design Of Oil Tanker Ships". 2019. Disponível em: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/oil-tanker-ships/>.

[37] ENVIRONMENT PROTECTION AUTHORITY (EPA). "Ballast water". 2019. Disponível em: <https://www.epa.vic.gov.au/your-environment/water/ballast-water>.

[38] GUARD, U. C. *Tanker Regulations, Double Bottoms and Segregated Ballast.* 1977.

[39] LINES, B. "Keeping containers on schedule". 2019. Disponível em: <https://www.marinetraffic.com/blog/keeping-containers-on-schedule/>.

[40] PARK, N. K., SUH, S. C. "Tendency toward mega containerships and the constraints of container terminals", *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 7, n. 5, pp. 1–13, 2019. ISSN: 20771312. doi: 10.3390/jmse7050131.

[41] KRISTENSEN, H. O., LÜTZEN, M. *Prediction of resistance and propulsion power of ships.* Relatório técnico, Technical University of Denmark, 2013. Disponível em: <http://www.skibstekniskselskab.dk/public/dokumenter/Skibsteknisk/Foraar2013/25.02.2013/WP2-Report4-ResistanceandPropulsionPower-FINAL-October2012.pdf>.

[42] KREITH2019. "Viscosidade cinematica". 2019. Disponível em: <http://www.hidrotec.xpg.com.br/tabvisc.htm>.

[43] FONTENELE, R. "Densidade". 2016. Disponível em: <http://www.abraqua.org.br/densidade/>.

[44] ANANTH, T. "3 Important Calculations Every Marine Engineer Must Know On Ships". 2020. Disponível em: <https://www.marineinsight.com/guidelines/3-important-calculations-every-marine-engineer-must-know/>.

[45] SMITH, T. W. P., JALKANEN, J. P., ANDERSON, B. A., et al. *Third IMO Greenhouse Gas Study 2014*. Relatório técnico, IMO, London, 2015. Disponível em: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/ThirdGreenhouseGasStudy/GHG3ExecutiveSummaryandReport.pdf>.

[46] MAN DIESEL & TURBO. *Costs and benefits of LNG as ship fuel for container vessels*. Relatório técnico, 2011. Disponível em: <http://www.gl-group.com/pdf/GL{_}MAN{_}LNG{_}study{_}web.pdf>.

[47] COOPER, D., GUSTAFSSON, T. *Methodology for calculating emissions from ships. 1. Update of emission factors*. Relatório Técnico 4, Swedish Environmental Protection Agency, Norrköping, 2004.

[48] ASIA SHIPPING. "Cabotagem é opção para diversificação da matriz logística brasileira". 2019. Disponível em: <https://bit.ly/3cLruEl>.

[49] MOORE, R. "Hapag-Lloyd: what's behind the world's largest box ship LNG retrofit". 2019. Disponível em: <https://bit.ly/39KrkLl>.

[50] EIA. *Annual Energy Outlook 2019 with projections to 2050*. Relatório Técnico 8, EIA, Washington, DC, 2019. Disponível em: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/aeo2019.pdf>.

[51] SHIP & BUNKER NEWS. "Bunker Prices Unusually High Relative to Crude as HFO Discount to Brent Disappears - Ship & Bunker". 2018. Disponível em: <https://bit.ly/2Q5DWVr>.

[52] BARESIC, D., SMITH, T., RAUCCI, C., et al. *LNG as a marine fuel in the EU*. Relatório técnico, UMAS, London, 2018.

[53] BALCOMBE, P., BRIERLEY, J., LEWIS, C., et al. "How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies", *Energy Conversion and Management*, v. 182, n. December 2018, pp. 72–88, 2019. ISSN: 01968904. doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.080.

[54] U.S. BUREAU OF LABOR STATISTICS. "Consumer Price Indexes Overview". 2020. Disponível em: <https://www.bls.gov/cpi/overview.htm>.

[55] EURONAV. *The Basics of the Tanker Shipping Market.* Relatório técnico, 2017. Disponível em: <https://www.euronav.com/media/65361/special-report-2017-eng.pdf>.

[56] EPE. *Balanço energético nacional.* Relatório técnico, Ministérios de Minas e Energia, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN2019CompletoWEB.pdf>.

[57] ERIA. "Recommendations for Expanding LNG Use". In: *Multilateral Joint Study on the Liquefied Natural Gas Market*, n. December, pp. 14–26, Jakarta, 2017.

[58] REUTERS. "Japan to invest $10 billion in global LNG infrastructure projects: minister". 2019. Disponível em: <https://reut.rs/2vWYNUc>.

[59] BRASIL. "LEI Nº 9.432, DE 8 DE JANEIRO DE 1997." 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil{_}03/LEIS/L9432.htm>.

[60] D'OLIVEIRA, R. "A NAVEGAÇÃO DE CABOTAGEM NO BRASIL: ÓBICES E PERSPECTIVAS PARA O INCREMENTO DESSE IMPORTANTE MODAL", 2017.

[61] ANP. "Dados estatísticos". 2020. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/dados-estatisticos>.

[62] CNT. "Acidentes Rodoviários com Caminhões". 2018. Disponível em: <https://cnt.org.br/acidentes-rodoviarios-caminhoes>.

[63] CARLINI, N. "Os verdadeiros entraves à cabotagem". 2019. Disponível em: <https://www.guiamaritimo.com.br/noticias/cabotagem/os-verdadeiros-entraves-a-cabotagem>.

[64] NEGÓCIOS EM TRANSPORTE. "Conheça o mercado dos quatro maiores tipos de transporte do Brasil". 2019. Disponível em: <https://bit.ly/2TEhlBI>.

[65] KRISTENSEN, H. O. *Determination of regression formulas for main dimensions of tankers and bulk carriers based on IHS Fairplay data.* Relatório Técnico 2010, Technical University of Denmark, 2012. Disponível em: <www.shipowners.dk>.

Apêndice A

Rotas

A.1 Petroleiros

https://drive.google.com/open?id=1JG0Qz3ucehmQ4bQ3V-UvDKmBxtZWXThr

A.2 Graneleiros

https://drive.google.com/drive/folders/1mEd-QNwnoaASQ6J2tgzNqBwvB2oXDaLg?usp=sharing

A.3 Porta Contêiners

https://drive.google.com/drive/folders/1x61jI4YCcfJV6Q1TGNaH84jc_-2TaUkZ6?usp=sharing

Apêndice B

Equações de Regressão Linear dos Navios

As equação são referentes à [65].

B.1 Petroleiros

Pequenos Petroleiros

$$L_{\text{pp}} = 6,809\ DWT^{0,3048}$$

$$B = 1,406\ DWT^{0,285}$$

$$D = 0,33\ DWT^{0,343}$$

$$LWT = 0,2096 - 0.00000724\ \ DWT$$

Handysize

$$L_{\text{pp}} = 3,9547\ DWT^{0,3684}$$

$$B = 8.99 + 0.000874\ \ DWT$$

$$D = 7 + 0,0000523\ \ DWT$$

$$LWT = 0,1584 - 0,00000145\ \ DWT$$

Handymax

$$L_{\text{pp}} = 41,647\ DWT^{0,133}$$

$$B = M\acute{i}nimo[15,04 + 0,000369\ \ DWT; 32,2]$$

$$D = 7.41 + 0,000106\ \ DWT$$

$$LWT = 1.05\ \ (0,1765 - 0,00000175\ \ DWT)$$

Panamax

$$L_{\text{pp}} = 193,26 + 0,000353\ \ DWT$$

$$B = 32,06 + 0.0000023\ \ DWT$$

$$D = 2,76 + 0,000156\ \ DWT$$

$$LWT = 1,05\ \ (0,0924 + 0,000000084\ \ DWT)$$

Aframax

$$L_{\text{pp}} = 187,92 + 0,000431\ \ DWT$$

$$B = 1,5658 * DWT^{0,285}$$

$$D = 0,0848\ \ DWT^{0,4454}$$

$$LWT = 1,05\ \ (0,0859 - 0,0000000235\ \ DWT)$$

Suezmax

$$L_{\text{pp}} = 222,41 + 0,000263\ \ DWT$$

$$B = 23,95 + 0,000153\ \ DWT$$

$$D = 0,2476\ \ DWT^{0,353}$$

$$LWT = 1,05\ \ (0,1296 - 0,000000308\ \ DWT)$$

VLCC

$$L_{\text{pp}} = 267,12 + (DWT - 170000) \ \ 0,0005975$$

$$B = 49,96 + (DWT - 170000) \ \ 0,00009219$$

$$D = 17,38 + (DWT - 170000) \ \ 0,00002147$$

$$LWT = 1,05 \ \ (0,0772 - (DWT - 170000) \ \ 0,0000001574)$$

B.2 Graneleiros

Pequenos Graneleiros

$$L_{\text{pp}} = 5,582 \ \ DWT^{0,329}$$

$$B = 11 + 0,001 \ \ DWT - 0,00000001675 \ \ DWT^2$$

$$D = 0,529 \ \ DWT^{0,285}$$

$$LWT = 1,05 \ \ (0,0772 - (DWT - 170000) \ \ 0,0000001574)$$

Handysize

$$L_{\text{pp}} = 5,463 \ \ DWT^{0,3285}$$

$$B = 14,86 + 0,00045 \ \ DWT$$

$$D = 6,2 + 0,000141 \ \ DWT$$

$$LWT = 1,05 \ \ (0,153 - 0,00000158 \ \ DWT)$$

Handymax

$$L_{\text{pp}} = 25,66 \ \ DWT^{0,0,1813}$$

$$B = M\acute{i}nimo(18,93 + 0,000272 \ \ DWT; 32.2)$$

$$D = 6,84 + 0.000101 \ \ DWT$$

$$LWT = 1.05\ (0,151 - 0,00000127\ \ DWT)$$

Panamax

$$L_{\text{pp}} = 107,00 + 0,0014\ \ DWT$$

$$B = 32,23$$

$$D = 8,43 + 0,0000735\ \ DWT$$

$$LWT = 1,05 * 0.079$$

Capesize

$$L_{\text{pp}} = 5,705 * DWT^{0.322}$$

$$B = 27,80 + 0,00012\ \ DWT$$

$$D = 0,179\ \ DWT^{0,3814}$$

$$LWT = 0,00817 - 0,0000000486\ DWT$$

B.3 Porta-Conteiner

Pequenos Porta-Contêineres

$$DWT = 13,65$$

$$L_{\text{pp}} = 10,14\ \ TEU^{0.378}$$

$$B = 2,9\ \ TEU^{0.3}$$

$$D = 0,827\ \ TEU^{0,336}$$

$$LWT = 0,659 * TEU^{\text{-}0,23}$$

Panamax

$$DWT = 14,6 - 0,00038 \ TEU$$

$$L_{\text{pp}} = 2,494 \ TEU^{0,555}$$

$$B = 32,22$$

$$D = 2,19 \ TEU^{0,211}$$

$$LWT = 0,105$$

Post Panamax

$$DWT = Máximo(11,2; 50,43 \ TEU^{\text{-}0,16})$$

$$L_{\text{pp}} = 131,31 + 0,03012TEU\tilde{}0,00000099556TEU^2$$

$$B = 32,51 + 0,0013 \ TEU$$

$$D = 12,73 + 0,0002 \ TEU$$

$$LWT = 0,105$$

Apêndice C

Eficiências

C.1 Eficiência de casco

A eficiência do casco é uma função entre a potência efetiva e a potência de empuxo entregue à água;

$$\eta_{\mathrm{H}} = \frac{P_{\mathrm{E}}}{P_{\mathrm{H}}} = \frac{R_{\mathrm{T}} v}{T v_{\mathrm{a}}} = \frac{R_{\mathrm{T}}/T}{v_{\mathrm{A}}/v} = \frac{1-t}{1-w} \tag{C.1}$$

C.2 Eficiência da hélice

A eficiência de águas abertas η_{O} refere-se ao funcionamento da hélice em um campo homogêneo, sem casco. Normalmente, varia entre 0,35 e 0,75, com altos valores ocorrendo em altas velocidades de avanço.

C.3 Eficiência Rotativa

A eficiência rotativa é a razão entre a velocidade antes e depois da hélice. O valor normalmente varia entre 1,00 e 1,07.

C.4 Eficiência de Transmissão ou de Eixo

A eficiência de transmissão varia entre 0,960 e 0,995.

Apêndice D

Código em Python

O link a seguir direciona para uma pasta com os códigos escritos para este trabalho. Os códigos foram escritos no Python 3.7 na interface Spyder. Para conseguir rodar é necessário mudar o lugar de salvamento e abertura dos arquivos.

https://drive.google.com/drive/folders/1wuBA1vs-OdOjbQT6eItemM1FHLZiacuK?usp=sharing