

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

PAULO CEZAR DE AZEVEDO JUNIOR

**REDE LOGÍSTICA DE GÁS NATURAL PARA ABASTECIMENTO DE
EMBARCAÇÕES NA AMAZÔNIA BRASILEIRA**

MANAUS-AM
2017

PAULO CEZAR DE AZEVEDO JUNIOR

**REDE LOGÍSTICA DE GÁS NATURAL PARA ABASTECIMENTO
DE EMBARCAÇÕES NA AMAZÔNIA BRASILEIRA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Amazonas como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Nelson Kuwahara

MANAUS-AM
2017

A994r Azevedo Junior, Paulo Cezar de
Rede logística de gás natural para abastecimento de
embarcações na Amazônia brasileira / Paulo Cezar de Azevedo
Junior. 2017
98 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Nelson Kuwahara
Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) -
Universidade Federal do Amazonas.

1. Navegação Interior. 2. Abastecimento de Embarcações. 3. GNL
de Pequeno Porte. 4. Arco Norte. 5. Otimização. I. Kuwahara,
Nelson II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

AGRADECIMENTOS

À Deus, doador de todas as coisas.

À minha esposa Ingrid pelo suporte, paciência e pelos muitos sacrifícios que fez para que a conclusão deste trabalho fosse possível.

Aos meus pais Paulo e Ester e à minha irmã Simone, não apenas pelo legado de educação e suporte por toda a minha vida, mas também pelos incentivos valiosos na reta final de elaboração deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Nelson Kuwahara, que acreditou no projeto desde o início e manteve seu valioso suporte mesmo nos momentos mais difíceis. Sua paciência, direcionamento e constante apoio mantiveram meu entusiasmo.

Ao Prof. Dr. André Bergsten, da USP, cuja ajuda foi imprescindível para o sucesso do tratamento analítico do problema e que sempre se mostrou disponível para ajudar nas mais diversas ocasiões.

Aos professores do PPGEF-UFAM pelos ensinamentos passados ao longo do curso, especialmente o Prof. Dr. Eduardo Jardim, um sábio e mentor intelectual. Aos professores Dra. Ocilde Custódio e Dr. Rafael Medeiros pelas valiosas observações feitas no Exame de Qualificação, que muito contribuíram para o aumento da qualidade do trabalho.

Ao Prof. Dr. Eduardo Barreda, da UEA, cuja dedicação e liderança me incentivaram nos últimos anos a insistir no compromisso com a academia.

Aos meus chefes da Hidrovias do Brasil S.A., Mário Sidrim, Mariana Yoshioka e Guilherme Pissaia, pelo suporte e compreensão nos últimos dias de finalização do texto.

Ao Eng. Flávio Silveira, quem primeiro me expôs ao tema, já com a confiança de responsabilizar-me por projeto tão motivador e inovador como foram os testes de conversão *dual-fuel* do empurrador Bertolini LXXVI.

Aos especialistas do setor de gás natural e propulsão com quem muito aprendi nos últimos anos: Antonio Bermudo (Convergás); Filipe Silva, Sérgio Molgori, Hector Ibanez e Thiago Malicheski (Bosch Engineering), Sérgio Lamarca (Ghenova) e Prof. Dr. Orestis Schinas (HSBA).

Agradeço também ao Rodrigo Martins e ao Davi Marques, da Cigás, pela disponibilidade em compartilhar ideias e informações.

*“Deus deve ter sido um armador.
Ele colocou as matérias-primas
longe de onde elas são necessárias
e cobriu 2/3 do mundo com água”.*

Erling Naess, armador norueguês

RESUMO

Antes interpretada como uma alternativa do futuro, a utilização do gás natural liquefeito (GNL) como combustível em embarcações já é uma realidade no mundo e consolida-se cada vez mais como uma indústria em forte expansão. No Brasil, apesar dos obstáculos ainda existentes, as condições adequadas ao seu florescimento estão amadurecendo: preços favoráveis, disponibilidade crescente de gás natural, aumento da percepção pública dos impactos ambientais das atividades de transporte, entre outros fatores. Este trabalho analisa aspectos técnicos, econômicos e regulatórios de sistemas de abastecimento de gás natural liquefeito de pequeno porte (GNL-PP) com foco em sua aplicação em navegação interior na Amazônia Brasileira. Em seguida, propõe um modelo conceitual e matemático para dimensionamento de uma rede logística para abastecimento de gás nos terminais de exportação de grãos do Arco Norte. Essa rede, formada por uma frota de balsas de armazenamento e abastecimento de GNL, foi otimizada para um conjunto de cenários e os resultados foram analisados à luz da minimização dos custos do sistema. A solução de menor custo resultou numa frota de 6 balsas operando com velocidade média de 10 nós, cada uma com capacidade de 400 m³.

Palavras-chave: otimização; navegação interior; abastecimento de embarcações; GNL de Pequeno Porte; Amazônia; Arco Norte.

ABSTRACT

Previously seen as an alternative of the future, the employment of liquefied natural gas (LNG) as ship fuel is already a reality worldwide and is consolidating itself as fast-growing industry. In Brazil, despite the remaining obstacles, the conditions for its flourishing are maturing: favorable prices, increasing natural gas availability, growth in the public perception of the transportation activities' environmental impacts, among other factors. This work analyzes technical, economical and regulatory aspects of Small Scale LNG (SSLNG), focusing on its application on inland shipping in the Brazilian Amazon. Further on, it proposes a conceptual and mathematical model for the sizing of a LNG bunkering logistics network deployed in the Northern Arc's grains export terminals. This network, made up of a storage and bunkering LNG barge fleet, was optimized for a set of scenarios and the results were analyzed in light of the minimization of the costs of the system. The solution with the smallest cost resulted in a fleet of 6 barges operating in an average speed of 10 knots, each with a capacity of 400 m³.

Keywords: optimization; inland shipping; ship bunkering; Small Scale LNG; Amazon; Northern Arc.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Arco Norte.....	17
Figura 2 – Fatores associados ao sucesso do GNL como combustível naval	20
Figura 3 – Composição típica do gás natural	23
Figura 4 – Áreas de Controle de Emissões, ECA’s.....	28
Figura 5 – Evolução das regulações de emissões da IMO	29
Figura 6 – Exemplos de embarcações propelidas a gás natural	31
Figura 7 – Ferryboat “Ivete Sangalo”.....	35
Figura 8 – Arranjo de testes do empurrador Bertolini LXXVI	36
Figura 9 – Principais fontes potenciais de demanda para GNL na Amazônia	37
Figura 10 – Base de produção da Petrobras em Urucu, AM	40
Figura 11 – Pontos de potencial oferta de gás natural da Amazônia.....	41
Figura 12 – Cadeia de Suprimento tradicional de gás natural	44
Figura 13 – Prelude FLNG	44
Figura 14 – FSRU de Pecém, no Ceará	45
Figura 15 – Cadeia de suprimento de sistemas SSLNG.....	47
Figura 16 – Operações STS (A) e TPS (B)	48
Figura 17 – Operação TTS	48
Figura 18 – LNGTainer: exemplo de sistema de abastecimento modular	49
Figura 19 – Balsa de abastecimento Seagas	51
Figura 20 – Balsa de abastecimento Clean Jacksonville	52
Figura 21 – ATB da Q-LNG Transport	52
Figura 22 – Navio de abastecimento de GNL Damen 6.500 m3.....	53
Figura 23 – Balsa de calado raso para abastecimento de GNL	54
Figura 24 – Sistemática de resolução de problemas de Pesquisa Operacional	54
Figura 25 – Estrutura da Metodologia.....	58
Figura 26 – Procedimento computacional	59
Figura 27 – Área de interesse do estudo.....	60
Figura 28 – Modelo da rede de distribuição, incluindo acessos rodoviários.....	64
Figura 29 – Rota 1: Porto Velho – Itacoatiara.....	66
Figura 30 – Rota 2: Porto Velho – Santarém	67
Figura 31 – Rota 3: Porto Velho – Barcarena	67

Figura 32 – Rota 4: Miritituba – Santarém.....	67
Figura 33 – Rota 5: Miritituba – Barcarena.....	68
Figura 34 – Rota 6: Miritituba – Santana	68
Figura 35 – Embarcações abastecedoras de GNL	71
Figura 36 – Comboio típico para a Rota 1	74
Figura 37 – Resultados do cálculo da resistência hidrodinâmica dos comboios.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Armadores e rotas	69
Tabela 2 – Matriz de distâncias (km)	69
Tabela 3 – Terminais Graneleiros: origens e destinos, total.....	70
Tabela 4 – Terminais Graneleiros: origens e destinos, dados desagregados.....	70
Tabela 5 – Parâmetros dos combustíveis.....	71
Tabela 6 – Parâmetros Operacionais, Ambientais e de Máquinas	72
Tabela 7 – Parâmetros Econômico-Financeiros	73
Tabela 8 – Dados dos comboios típicos por rota.....	73
Tabela 9 – Método de Howe: dados comuns a todos os comboios	74
Tabela 10 – Matriz de tempos de viagem em horas: comboios graneleiros.....	75
Tabela 11 – Matriz de tempos de viagem em dias: comboios graneleiros	75
Tabela 12 – Matriz de tempos de viagem em horas: balsas GNL	76
Tabela 13 – Matriz de tempos de viagem em dias: balsas GNL	76
Tabela 14 – Consumo de combustível por viagem redonda.....	77
Tabela 15 – Consumo de combustível por porto.....	77
Tabela 16 – Taxa de adoção de GN: Cenário de consumo 1.....	77
Tabela 17 – Taxa de adoção de GN: Cenário de consumo 2.....	77
Tabela 18 – Custos de navegação entre os portos i e j (R\$).....	82
Tabela 19 – Resultados.....	84

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABS	<i>American Bureau of Shipping</i>
AHTS	<i>Anchor handling tug supply</i>
AJB	Águas Jurisdicionais Brasileiras
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
ATB	<i>Articulated Tug and Barge</i>
BAR	Barcarena (PA)
BHP	<i>Break horse power</i>
BOG	<i>Boil-off gas</i>
BV	<i>Bureau Veritas</i>
CAPEX	<i>Capital Expenses</i> , Despesas de Capital
CNG	<i>Compressed natural gas</i>
DNV GL	<i>Det Norske Veritas Germanischer Lloyd</i>
DPC	Diretoria de Portos e Costas
DWT	<i>Deadweight</i>
E/M	Empurrador
ETC	Estação de Transbordo de Cargas
FLNG	<i>Floating Liquefied Natural Gas</i>
FRU	<i>Floating Regasification Unit</i>
FSRU	<i>Floating Storage Regasification Unit</i>
FSU	<i>Floating Storage Unit</i>
GHG	<i>Greenhouse gas</i>
GN	Gás natural
GNC	Gás natural comprimido
GNL	Gás natural liquefeito
GNL-PP	Gás natural liquefeito de pequeno porte
GNV	Gás natural veicular
GTL	<i>Gas to liquids</i>
GTW	<i>Gas to wire</i>
HBSA	Hidrovias do Brasil S.A.
HFO	<i>Heavy fuel oil</i>

HP	<i>Horsepower</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IMO	<i>International Maritime Organization</i>
IFO	<i>Intermediate fuel oil</i>
IRP	<i>Inventory Routing Problem</i>
ITA	Itacoatiara (AM)
LCNG	<i>Liquefied-Compressed Natural Gas</i>
LDC	Louis Dreyfus Commodities
LNG	<i>Liquefied natural gas</i>
MAO	Manaus (AM)
MATOPIBA	Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia
MDO	<i>Marine diesel oil</i>
MGO	<i>Marine gasoil</i>
MSC	<i>Maritime Safety Committee</i>
MTPA	<i>Million Tons per Annum</i>
MTT	Miritituba (PA)
MW	Megawatt
NGV	<i>Natural Gas Vehicle</i>
NO _x	Óxidos de nitrogênio
OPEX	<i>Operational Expenses</i> , Despesas Operacionais
PPI	Programa de Parcerias de Investimentos
PRV	Problema de Roteirização (ou Roteamento) de Veículos
PSV	<i>Platform supply vessel</i>
PVH	Porto Velho (RO)
SAN	Santana (AP)
SGMF	<i>The Society for Gas as a Marine Fuel</i>
SIGTTO	<i>The Society of International Gas Carrier and Terminal Operators</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
SO _x	Óxidos de enxofre
SPC	<i>Soy protein concentrate</i>
SSLNG	<i>Small Scale Liquefied Natural Gas</i>
STM	Santarém (PA)
STS	<i>Ship to ship</i>
TEN-T	Trans-European Transport Networks

TERFRON	Terminal Portuário Fronteira Norte
TGPM	Terminal de Grãos Ponta da Montanha
TPB	Toneladas de Porte Bruto
TPS	<i>Terminal to ship via pipeline</i>
TKU	Tonelada por quilômetro útil
TTS	<i>Truck to ship</i>
TUP	Terminal de Uso Privado
TWP	<i>Technology Warming Potential</i>
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Termelétrica
VOYEX	<i>Voyage Expenses</i> , Custos de Viagem
WTI	<i>West Texas Intermediate</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

a_{pi}	Parâmetro binário que será 1 se o nó de demanda i se refere ao porto p , e 0, em caso contrário
C_{ijk}^N	Custo de navegação entre os nós i e j da rede com a balsa k (R\$)
C_k	Custo de capital da balsa k (R\$)
Cap_k	Capacidade da balsa k (m ³)
J_i	+1, se o porto i for de suprimento, e -1 se o porto i for de consumo
N	Conjunto de portos, índices p
N^D	Conjunto de nós de demanda da rede, índices i e j
q_{ikr}	Variável contínua que registra o total carregado pela balsa k visando abastecer o porto i na viagem v
R	Conjunto de viagens, índice r
R_i	Taxa diária de produção ($J_i=+1$), ou taxa diária de consumo ($J_i = -1$) do nó i
T_i^Q	Tempo para movimentação de um m ³ no nó i (dias)
T	Horizonte de planejamento (dias)
$TW a_i$	Limite inferior da janela de tempo em que uma balsa deve chegar a um nó i de demanda da rede
$TW b_i$	Limite superior da janela de tempo em que uma balsa deve chegar a um nó i de demanda da rede
T_{ijk}	Tempo de navegação entre os nós i e j com a balsa k (dias)
t_{ikr}	Variável contínua que registra o instante de início da operação no porto i pela balsa k na viagem r , e 0, em caso contrário
V	Conjunto de balsas, índice k
x_{ijkr}	Variável binária que será 1 se a balsa k percorrer o arco (i, j) na viagem r , e 0, em caso contrário
z_k	Variável binária que será 1 se a balsa k for utilizada (incorporada à frota), e 0, em caso contrário

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1.	APRESENTAÇÃO	16
1.2.	OBJETIVOS	18
1.3.	JUSTIFICATIVA	19
1.4.	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	21
1.5.	ESTRUTURA DO TEXTO	22
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	23
2.1.	GÁS NATURAL: PROPRIEDADES.....	23
2.2.	A INSERÇÃO DO GÁS NATURAL NA MATRIZ DE TRANSPORTES.....	24
2.2.1	<i>GÁS NATURAL COMO COMBUSTÍVEL.....</i>	<i>24</i>
2.2.2	<i>DINÂMICA DE PREÇOS.....</i>	<i>25</i>
2.2.3	<i>REGULAÇÃO DE EMISSÕES.....</i>	<i>27</i>
2.3.	ANÁLISE DO CENÁRIO INTERNACIONAL	30
2.4.	ANÁLISE DO CENÁRIO NACIONAL	33
2.5.	DEMANDA POTENCIAL NA AMAZÔNIA BRASILEIRA	37
2.6.	OFERTA DO GÁS NATURAL COMO COMBUSTÍVEL NA AMAZÔNIA	39
2.7.	INFRAESTRUTURA PARA TRANSPORTE E ABASTECIMENTO.....	43
2.7.1	<i>A CADEIA DE SUPRIMENTO DE GÁS NATURAL.....</i>	<i>43</i>
2.7.2	<i>GÁS NATURAL LIQUEFEITO DE PEQUENO PORTE.....</i>	<i>45</i>
2.7.3	<i>SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE GNL EM NAVIOS.....</i>	<i>47</i>
2.7.4	<i>SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO A BORDO</i>	<i>50</i>
2.7.5	<i>MOTORES, GERADORES E EQUIPAMENTOS AUXILIARES.....</i>	<i>50</i>
2.7.6	<i>TIPOS DE EMBARCAÇÕES DE ABASTECIMENTO.....</i>	<i>51</i>
2.8.	MODELOS MATEMÁTICOS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO.....	54
3	METODOLOGIA.....	57
3.1.	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	57
3.2.	IDENTIFICAÇÃO DOS DADOS	57
3.3.	ESTRUTURA DA METODOLOGIA.....	58
4	MODELO.....	60
4.1.	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	60
4.2.	DESCRIÇÃO E APLICAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL	64
4.2.1	<i>PREMISSAS.....</i>	<i>65</i>
4.2.2	<i>ROTAS.....</i>	<i>66</i>

4.2.3	<i>TERMINAIS GRANELEIROS</i>	69
4.2.4	<i>EMBARCAÇÕES DE ABASTECIMENTO DE GNL</i>	70
4.2.5	<i>PARÂMETROS GERAIS</i>	71
4.2.6	<i>DEMANDA POR GNL</i>	73
4.3	APRESENTAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO	78
5	RESULTADOS E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	83
6	CONCLUSÃO E PESQUISAS FUTURAS	86
7	REFERÊNCIAS	88

1 Introdução

1.1. Apresentação

Historicamente, a propulsão de embarcações deu-se por meios sustentáveis: ora pelo esforço humano ao remar, ora pelo aproveitamento da energia dos ventos. Com a revolução industrial, a energia propulsiva passou a ser fornecida por lenha, por carvão e, nos últimos 100 anos, por derivados de petróleo. Porém, com a crescente consciência ambiental nas sociedades causada pela percepção das diversas formas de poluição e do aquecimento global, o mundo hoje se encontra num período de transição (MACLEAN et al., 2016). Antes que novas soluções sustentáveis viáveis sejam encontradas, é preciso adotar fontes de energia que, embora ainda finitas e poluentes, possam reduzir o impacto ambiental do transporte marítimo e interior, a custos competitivos (THOMSON et al., 2015; XU et al., 2015). Num futuro talvez um pouco distante, as embarcações utilizarão instalações propulsoras mais eficientes e ambientalmente responsáveis, como energia solar, baterias elétricas e células de hidrogênio (ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING, 2013; LLOYD'S REGISTER & UMAS, 2017). Até lá, é do interesse da sociedade uma redução da dependência das frações mais pesadas do petróleo, que poluem mais e competem com aplicações mais nobres, como a fabricação de materiais plásticos. Uma das fontes que tem, progressivamente, assumido esse papel, é o gás natural.

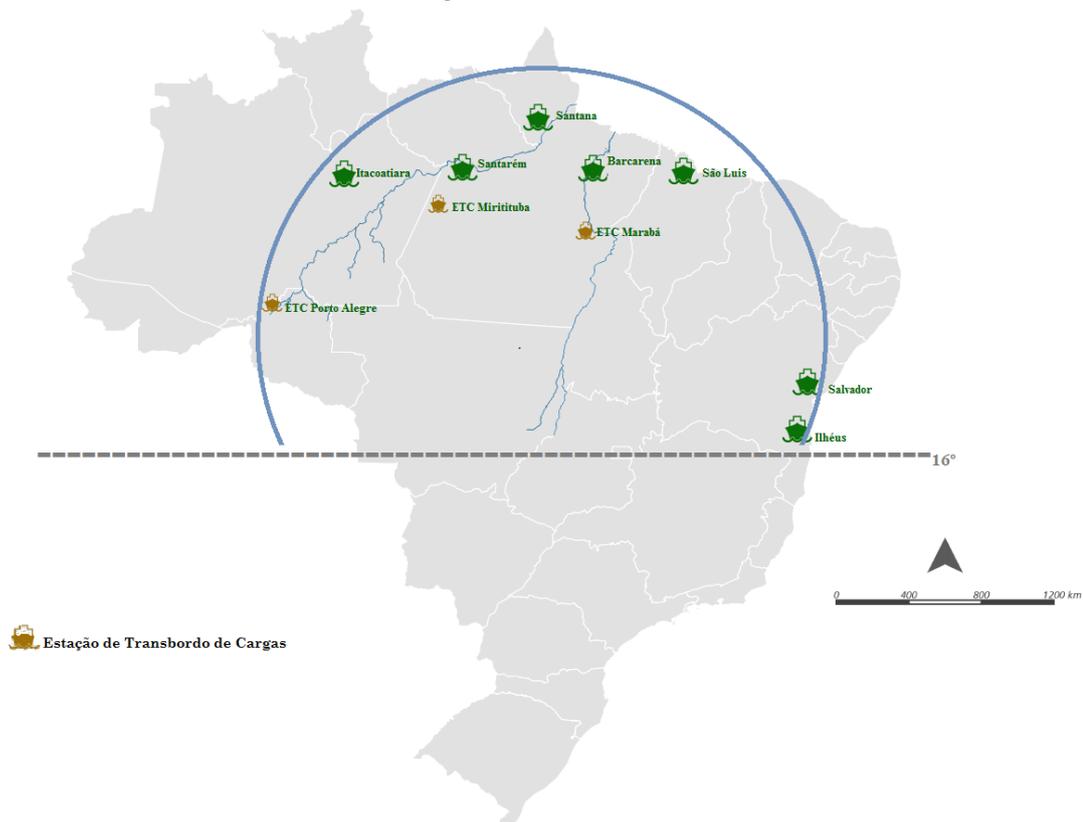
O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos leves com outras moléculas como dióxido de carbono, nitrogênio, hélio, entre outros (IMO, 2009). Entretanto, seu principal componente é sempre o metano, CH_4 . Por ser o hidrocarboneto mais simples, é o que fornece a maior quantidade de energia por unidade de massa (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2016). Essa eficiência energética é uma de suas propriedades mais atraentes. Há, porém, outras quatro razões para sua crescente adoção como combustível de transição: preços estruturalmente competitivos em relação aos derivados de petróleo; pressões mercadológicas e regulatórias pela adoção de combustíveis que gerem menos emissões de poluentes; amadurecimento do mercado de gás natural com o desenvolvimento de novas tecnologias para sua produção, transporte, armazenamento e consumo; e a sua crescente disponibilidade devido às descobertas de reservas gigantes nas mais diversas regiões do planeta (EL GOHARY & SEDDIEK, 2013; WANG & NOTTEBOOM, 2013; WAN et al., 2015).

Nesse contexto, um problema que emerge é como prover a infraestrutura adequada para o consumo mais amplo do gás natural em propulsão naval. Relativamente comum no

desenvolvimento de infraestrutura, tal problema costuma ser ilustrado pelo “dilema do ovo e da galinha” (AHLFELDT et al., 2014; GNANN et al., 2015;; PETERS & WAINWRIGHT, 2017). No caso em estudo, é preciso fazer a pergunta: o que deve se desenvolver antes? A infraestrutura de abastecimento ou a demanda pelo combustível? Os governos e investidores receiam apostar somas vultosas de recursos em uma rede de abastecimento temendo não haver, no futuro, a demanda adequada pelo novo combustível. Os operadores logísticos, por outro lado, receiam investir em embarcações aptas a queimar o novo combustível e, portanto, mais caras inicialmente, sem a garantia que haverá a infraestrutura para abastecê-las. O presente trabalho buscará contribuir com o suporte ao planejamento e dimensionamento da infraestrutura de transporte de gás natural em embarcações. Por associação a experiências internacionais (WAN et al., 2015; KHAN, 2017), entende-se que a demanda, potencialmente reprimida, florescerá em seguida.

No Brasil, o gás como combustível naval poderia ser usado em diferentes regiões. A navegação interior na Amazônia brasileira, porém, tem crescido sobremaneira em relevância na última década, especialmente devido ao chamado “Arco Norte”. (FOLHA DE S. PAULO, 2016; PEREIRA, 2017). O Arco Norte é o conjunto de portos brasileiros responsáveis pelo escoamento de granéis sólidos e que se encontram acima do Paralelo 16° Sul (Figura 1).

Figura 1 – Arco Norte



Fonte: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2017

Somando-se à navegação secular que tem se desenvolvido na região norte para o transporte de passageiros e das mais diversas cargas, o Arco Norte tem se tornado um relevante corredor de comércio exterior, com a exportação de grãos (especialmente soja e milho) e a importação de combustíveis e fertilizantes. Entre 2011 e 2016, a movimentação de soja no Arco Norte aumentou 88,5% e a de milho, 174,8% (ANTAQ, 2017). Além de terminais na região nordeste do Brasil (São Luís, Salvador e Ilhéus), fazem do arco os portos a serviço de navios de longo curso de Itacoatiara (AM), Santarém (PA), Barcarena (PA) e Santana (AP). Três portos de transbordo rodó-hidroviário (Estações de Transbordo de Carga, ETC's), localizados em afluentes do rio Amazonas, também estão incluídos no sistema: Porto Velho (RO), Miritituba (PA) e Marabá (PA). A navegação a partir de Marabá, no rio Tocantins, não foi incluída neste trabalho, por depender de vultosa obra a cargo do poder público ainda sem perspectiva de concretização: o derrocamento e a dragagem do Pedral do Lourenço (G1 PARÁ, 2017).

Será proposto, ao final, um modelo conceitual e matemático para o emprego do gás natural como combustível naval nas vias navegáveis interiores do Arco Norte: os rios Madeira, Tapajós e Amazonas. O modelo é uma variante do Problema de Roteirização (ou Roteamento) de Veículos (PRV) e buscará otimizar a rede logística composta por balsas de abastecimento de gás natural liquefeito (GNL), como parte de um sistema de pequeno porte (GNL-PP). Para um conjunto de cenários, o modelo minimizará os custos e fornecerá em seguida um conjunto de dados que serão analisados comparativamente.

1.2. Objetivos

O objetivo geral é propor uma rede logística para abastecimento *ship to ship* (STS) de GNL (gás natural liquefeito) em comboios fluviais graneleiros na Amazônia brasileira.

Os objetivos específicos são:

1. Produzir uma consolidação teórica dos fatores associados à aplicabilidade do gás natural como combustível de embarcações, tanto em sentido amplo, como na Amazônia brasileira, em particular. Busca-se alcançar esse objetivo com as discussões do Capítulo 2;

2. Produzir um modelo conceitual da navegação interior do Arco Norte, incluindo um estudo de demanda de combustíveis, algo ainda não disponível na literatura. Busca-se alcançar esse objetivo com a descrição do Capítulo 4, item 2;
3. Propor um modelo matemático adequado à solução do problema. Busca-se alcançar esse objetivo com formulação do Capítulo 4, item 3;
4. Propor a rede logística mais adequada, com base na discussão de diferentes cenários e visando a minimização dos custos totais. Busca-se alcançar esse objetivo com a discussão do Capítulo 5.

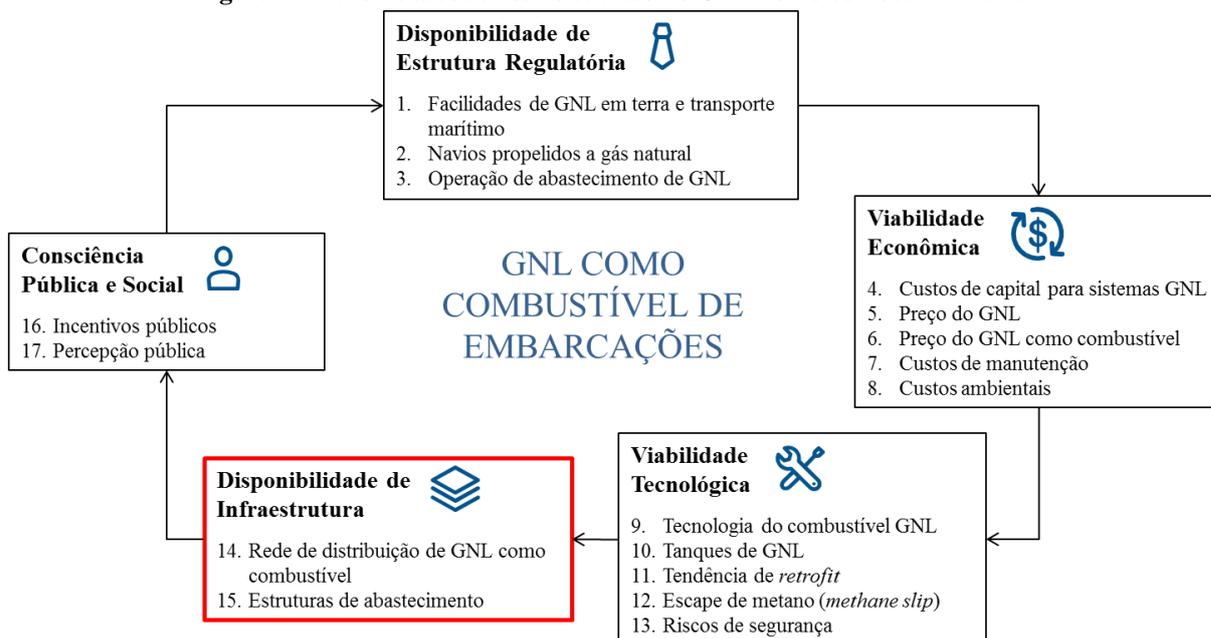
1.3. Justificativa

A região amazônica possui abundância de recursos fósseis. Alguns já descobertos, outros estimados. O gás natural produzido em Urucu, no Amazonas, significou vultosos investimentos em infraestrutura, mas está longe de ser plenamente utilizado. Hoje, mais de 60% do gás produzido é reinjetado por falta de demanda (ANP, 2017). Sobra, portanto, oferta de gás natural na região norte, mas essa oferta está mal distribuída, pois está disponível hoje apenas para consumo em Manaus. Por outro lado, a demanda por combustíveis de embarcações tem crescido de maneira pronunciada, especialmente devido ao grande volume de carga transportado pelos novos terminais portuários do Arco Norte (SANTIAGO, 2015; ZAPAROLLI, 2016; PEREIRA, 2017).

A navegação, tanto no contexto nacional como internacional, está sob constante pressão para reduzir seus custos e para minimizar seu impacto ambiental (BRYNOLF, 2014). A utilização do gás natural liquefeito (GNL) em propulsão naval, no papel de combustível menos poluidor, pode suprir essa demanda (LLOYD'S REGISTER, 2015).

Wang e Notteboom (2014) fizeram uma revisão sistemática de estudos e artigos publicados sobre o emprego de GNL como combustível naval, identificando 17 fatores (Figura 2) que afetam o sucesso ou fracasso do desenvolvimento do mercado de propulsão naval a GNL em 33 estudos. De cada estudo, então, foi extraída a identificação do estado no qual se encontra cada fator: se afeta positivamente a evolução do mercado, ou se afeta negativamente. Todos os estudos que abordaram o tema da disponibilidade de infraestrutura o entenderam como fator ainda muito aquém de suas mínimas condições para o favorecimento do GNL como combustível.

Figura 2 – Fatores associados ao sucesso do GNL como combustível naval



Fonte: Adaptado de Wang e Notteboom, 2014

O presente trabalho justifica-se, portanto, à medida que permite um aprofundamento na busca de soluções para o problema da oferta excedente e mal distribuída, juntamente com o atendimento à uma demanda reprimida por falta de rede de distribuição. Assim, por meio do planejamento da infraestrutura de transportes, será então possível fomentar uma nova alternativa energética na região Amazônica.

Com a disponibilidade cada vez maior de gás no mundo, no Brasil e, particularmente, no Amazonas, torna-se extremamente relevante a consideração desse combustível na propulsão de embarcações. Ainda que haja dificuldades diversas para seu emprego imediato, todas elas são superáveis com uma somatória de tecnologia, articulação de diferentes atores, vontade política, investimentos e pesquisas (THOMSON et al., 2015; YOKOHAMA, 2016; KHAN, 2017).

Ainda como parte da justificativa para a pesquisa, este trabalho busca trazer benefícios a três diferentes partes interessadas:

- **Ciência e Tecnologia:** ao fornecer uma nova aplicação prática para ferramentas de otimização matemática já consagradas e um melhor entendimento da rede logística do arco norte, ainda pouco estudada;
- **Universidade Federal do Amazonas:** ao produzir um estudo que se soma às linhas de pesquisa da Faculdade de Tecnologia-UFAM e que se insere na área de maior influência geográfica da instituição;

- Sociedade: ao fornecer um aprofundamento no entendimento das potencialidades do GNL como combustível naval e ao colaborar para uma navegação interior mais sustentável, segura e eficiente.

1.4. Delimitação do trabalho

Do ponto de vista espacial, o trabalho limita-se à região Norte do Brasil, mais especificamente aos rios Amazonas, Madeira e Tapajós.

Do ponto de vista temporal, o trabalho se insere num horizonte de planejamento de transportes de médio e longo prazo. Como o tempo esperado de construção de cada embarcação (tanto as balsas de abastecimento como os empurradores que empregarão o GNL como combustível) situa-se entre 18 e 24 meses, a maturação de uma frota mínima pode levar de 5 a 10 anos. Para contornar maiores incertezas, a demanda por GNL como combustível na região estudada foi dividida em 3 faixas de consumo, com 15, 35 e 55% de substituição em relação aos combustíveis marítimos usuais. Dependendo do desenvolvimento do mercado, o atingimento a esses referenciais pode levar mais ou menos tempo. Dentro de cada cenário, o horizonte de tempo inserido no modelo foi de 30 dias, que é período usual de planejamento operacional de uma companhia de navegação.

Do ponto de vista da dimensão, o trabalho está restrito a uma análise econômica, pois a função objetivo do modelo busca a minimização dos custos. Porém, as discussões feitas na revisão bibliográfica evidenciam que há forte apelo social e ambiental numa transição bem-sucedida para uma navegação mais sustentável (BUREL et al., 2013; VIANA et al., 2014; ANDERSON et al., 2015).

Do ponto de vista tecnológico, o trabalho se insere numa indústria nova e de rápida expansão, em que as inovações são constantes (INTERNATIONAL GAS UNION, 2015-a/b; DAMEN, 2017). Contudo, não fará parte do escopo do estudo discussões aprofundadas sobre o projeto dos equipamentos (tanques, terminais, sistemas de liquefação, regaseificação e carregamento, embarcações, máquinas embarcadas, etc.). A esse respeito, serão apresentados apenas os conceitos básicos necessários ao entendimento do problema.

Do ponto de vista da cadeia de suprimento de gás natural, o trabalho se restringe à distribuição do GNL aos consumidores finais, ou seja, ao mercado *downstream*. Além disso, o método de abastecimento considerado se restringe ao STS (*ship to ship*). Para maiores detalhes, ver item 2.7.

1.5. Estrutura do texto

O Capítulo 2, Revisão da Literatura, está dividido em 8 partes. A primeira (2.1) trata das propriedades do gás natural. As seções 2.2 a 2.4 tratam da inserção do gás natural na matriz de transportes e do estágio atual de desenvolvimento de sua aplicação marítima como combustível, no Brasil e no exterior. As seções 2.5 e 2.6 tratam, respectivamente, da demanda e da oferta de gás natural na Amazônia brasileira. Já o item 2.7 trata de uma visão geral do estado da arte da tecnologia e da infraestrutura associadas ao gás natural como combustível e a seção 2.8 trata da fundamentação teórica que dará sustentação à modelagem matemática do problema.

O Capítulo 3 trata da Metodologia empregada no trabalho, incluindo a classificação da pesquisa, a identificação dos dados e a estrutura dos métodos empregados.

O Capítulo 4 é a descrição do Modelo, tanto conceitual (4.2) como matemático (4.3).

Finalmente, o Capítulo 5 consolida os resultados e as análises de sensibilidade executadas e o Capítulo 6 descreve as conclusões e sugestões de pesquisa futuras.

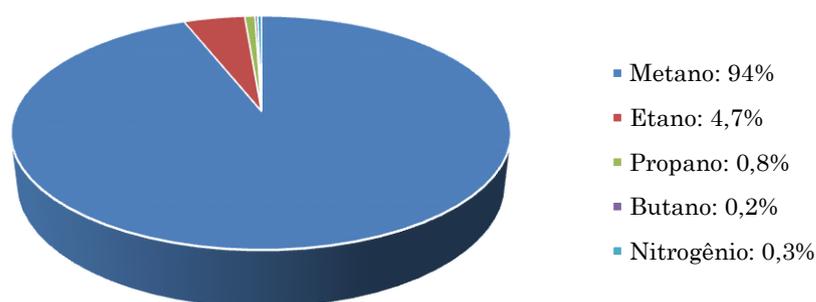
As Referências poderão ser acessadas no Capítulo 7.

2 Revisão da Literatura

2.1. Gás Natural: propriedades

O gás natural possui características que o tornam bastante atrativo. Ele apresenta elevada temperatura de autoignição: 595 °C (MOKHATAB et al., 2014). Como comparação, o diesel é de aproximadamente 210 °C. O gás natural praticamente não contém enxofre (portanto não emite gases SO_x). Sua combustão emite, em relação aos combustíveis tradicionais (HFO e MGO), aproximadamente 20-25% menos CO₂, 85-92% menos gases NO_x e 98-100% menos material particulado (STUER-LAURIDSEN, 2010; BIZI & TISCHER, 2012; EL GOHARY & SEDDIEK, 2013; TZANNATOS & NIKITAKOS, 2013; HARVEY GULF, 2017). A composição do gás natural (Figura 3) varia de acordo com sua origem geológica e seu processamento, mas a mistura típica considerada pela Organização Marítima Internacional (*International Maritime Organization*, IMO) evidencia que seu conteúdo é principalmente metano, com 94% em massa (IMO, 2009). Na Amazônia brasileira, hoje há apenas disponibilidade de gás natural a partir da produção de campos em terra na Bacia de Urucu, com posterior transporte por gasoduto até Manaus, no Amazonas. A composição do gás natural da Bacia de Urucu é um pouco mais pobre, com maior concentração de Nitrogênio (~14%) e menor concentração de metano (~74%).

Figura 3 – Composição típica do gás natural



Fonte: Adaptado de IMO, 2009

Por ser majoritariamente composto por metano, uma molécula simples, o gás natural queima de maneira bastante eficiente, tanto do ponto de vista econômico como ambiental. Seu armazenamento e distribuição ocorre de duas maneiras: gás natural comprimido (GNC) e gás natural liquefeito (GNL). Também são bastante utilizados os acrônimos em inglês: CNG e LNG, respectivamente. O GNC é processado em pressões entre 200 e 250 bar, necessitando, para isso, tanques e tubulação adequados a altas pressões. Já o GNL é processado em

temperaturas bastante baixas (abaixo de $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$), exigindo, para isso, tanques e tubulação criogênicos (IOGP, 2013). As duas intervenções são necessárias pois a baixa densidade do gás natural (entre $0,7$ e $0,8\text{ kg/m}^3$, dependendo da composição) faz com que seja necessário muito espaço para seu armazenamento à temperatura e pressão ambientes, quando se deseja obter a mesma energia equivalente de seus concorrentes, os combustíveis líquidos derivados de petróleo. Por isso, apesar de o gás ser transportado por gasodutos em pressões baixas e intermediárias, quando é considerada sua aplicação em veículos e embarcações (abastecimento e armazenamento), as únicas alternativas viáveis são por meio do GNC ou do GNL.

2.2. A inserção do gás natural na matriz de transportes

2.2.1 Gás natural como combustível

O gás natural possui múltiplas aplicações. É utilizado como matéria prima na indústria de fertilizantes e na indústria petroquímica na fabricação de polímeros; como fonte de calor em indústrias, estabelecimentos comerciais ou residências; como combustível para geração de energia termelétrica, entre outras aplicações. Neste trabalho, porém, o foco estará direcionado no estudo de seu uso como combustível em motores de equipamentos de transporte.

Os primeiros desenvolvimentos do uso do gás natural como combustível em transportes deu-se a partir da oportunidade surgida com o seu transporte a longas distâncias por navios e caminhões. Embora a forma mais eficiente de transportar o gás natural seja por gasodutos, para seu transporte entre continentes foram desenvolvidos navios tanque especializados (chamados de navios GNL ou metaneiros). Para o transporte dentro dos continentes a fim de vencer longas distâncias com esparsa infraestrutura, foram desenvolvidos caminhões tanque também especializados. Nessas condições, em que o gás natural é transportado como carga, parte do GNL volta ao estado gasoso no interior dos tanques (esse gás é chamado *de boil off gas*), sendo então necessário abrir válvulas de escape, para que a pressão no interior dos tanques não ultrapasse os valores máximos permitidos. Uma forma alternativa de aproveitamento desse gás é justamente empregá-lo para propulsão e consumo de energia a bordo dos veículos e navios. Com o amadurecimento da tecnologia embarcada, passou a ser possível utilizar também o gás natural como combustível, independentemente da carga transportada. Nesse caso, o gás natural precisa ser armazenado em tanques segregados. O

Brasil foi um dos pioneiros do desenvolvimento desse tipo de aplicação, com os veículos propelidos a gás natural comprimido, com a designação “gás natural veicular” (GNV). Com o tempo porém, a liderança em veículos propelidos a gás (*Natural Gas Vehicles, NGV's*) foi assumida por países asiáticos, com destaque para China, Irã e Paquistão, todos eles com frotas acima de 3,5 milhões de unidades. Ainda assim, há diversas barreiras para a adoção do GNV globalmente, por isso estudos têm buscado maneiras de viabilizar o GNV como política pública (KHAN, 2017; OGUNLOWO, BRISTOW & SOHAIL, 2017).

Ainda que o uso do gás natural como combustível em embarcações não seja essencialmente novo – os primeiros metaneiros remontam aos anos 50 e o uso do gás natural para geração de energia a bordo de plataformas de petróleo em alto mar remonta aos anos 60 (PETROBRAS, 1991) – é a partir dos anos 2000 que tem ocorrido uma constante intensificação nas pesquisas e investimentos de mercado na área (BUREL et al., 2013; WANG & NOTTEBOOM, 2013).

É importante ressaltar também que o gás natural não é o único combustível alternativo ou método inovador para transporte atualmente em desenvolvimento no mundo. Do lado dos combustíveis, merecem destaque também o metanol, o etanol e o hidrogênio. Deniz & Zincir (2016) forneceram um estudo comparativo bastante completo desses combustíveis e do GNL, em oposição aos combustíveis marítimos usuais. Para além dos combustíveis, destacam-se embarcações já operacionais 100% elétricas, seja com energia fotovoltaica gerada a bordo ou com carregamento de baterias (*plug-in*), como os *ferries* “*Ampere*” e “*Elektra*” (MARINE LOG, 2017-b).

2.2.2 Dinâmica de preços

O combustível é o maior componente dos custos de viagem de uma embarcação, e em média é possível considerá-lo como responsável ao redor de 30% dos custos operacionais totais das companhias de navegação (STOPFORD, 2009). Consequentemente, economias com combustível apresentam grande potencial de conferir vantagens competitivas aos armadores (BRETT, 2008).

Com o recente aumento da produção de gás natural na América do Norte, Rússia, África, Oriente Médio e Austrália, os preços desse combustível têm se mantido baixos, especialmente nos Estados Unidos. Entre 2007 e 2017, a produção norte-americana aumentou 44% e o preço caiu 52%, tendo ficado consistentemente abaixo de US\$5,00/MMBtu desde a crise de 2009. Esse aumento de produção tem mudado a dinâmica mundial do gás natural a tal

ponto que os EUA já exportam gás até mesmo para o Oriente Médio (GCAPTAIN, 2017-b). Em Novembro de 2017, o preço spot de referência *Henry Hub* oscilava ao redor de US\$3,00/MMBtu (U.S. EIA, 2017). O preço do gás natural, porém, não pode ser analisado isoladamente. Seus principais concorrentes são o carvão e os derivados de petróleo para a geração de energia elétrica. Para o emprego como combustível em propulsão naval, ele concorre principalmente com os óleos combustíveis marítimos (IFO e HFO) e os gasóleos (MGO ou diesel marítimo) (MAXWELL & ZHU, 2011). Como todos eles são derivados do petróleo, podemos verificar a atratividade do gás natural comparando seus preços com o petróleo, para um mesmo conteúdo de energia, dado em Unidades Térmicas Britânicas (*British Thermal Units*, Btu's). Em Novembro de 2017, o preço de referência norte-americano do petróleo (WTI) estava em aproximadamente US\$10,50/MMBtu, aproximadamente 250% acima do preço do gás natural. Na Europa o gás natural também tem sido competitivo. Por exemplo, na região do Mar do Norte, mesmo aplicações não convencionais como navios transportadores de CO₂ são viáveis usando GNL ao invés de MGO, contanto que o preço do petróleo esteja cima de US\$50 (YOO, 2017). No Ásia, a importação de gás natural tem crescido de maneira consistente nos últimos anos. O Japão, que desligou todas as suas usinas nucleares após o desastre de Fukushima de 2011, viu suas importações de GNL aumentarem mais de 25% em de 2010 a 2014 (STILES, 2016). Com isso, o país se tornou o maior importador mundial de GNL, sendo responsável por 1/3 das importações do planeta (BP, 2017), num total de 85 milhões de toneladas em 2015. No mesmo período, os preços pagos pelo Japão subiram de US\$10,00/MMBtu para US\$15,00/MMBtu. Após a baixa de preços causada pelo religamento de algumas usinas nucleares, o preço pago pelos importadores japoneses tem oscilado entre US\$6,00/MMBtu e US\$9,00/MMBtu (HELLENIC SHIPPING, 2017). Essa realidade de preços internacional, em que nota-se uma sustentada competitividade do gás natural em relação aos outros combustíveis fósseis, tem provocado grandes transformações no uso do gás natural como combustível embarcado, tanto em veículos como em embarcações.

No Brasil, a dinâmica de preços é diferente. Como a Petrobras ainda detém um monopólio de fato da logística do gás natural, sua política de preços determina os preços do mercado. A Petrobras e suas subsidiárias controlam toda a infraestrutura de importação de gás natural do país: os três terminais de regaseificação de GNL (localizados na Baía de Guanabara, na Baía de Todos os Santos e no Porto de Pecém) e o gasoduto Bolívia – Brasil (Gasbol). Além disso, também está sob seu domínio a rede de gasodutos de interligação do país e suas conexões com os campos produtores em alto mar. Por isso, os preços aos

consumidores finais, sejam eles pessoas físicas ou jurídicas, é determinado principalmente por contratos de longo prazo firmados entre a Petrobras e as distribuidoras locais de gás natural, que frequentemente têm a própria Petrobras como sócia. Por exemplo, no Amazonas, apesar do gás ser competitivo em relação ao diesel vendido localmente, seu preço está muito acima das referências internacionais.

Com isso, a competitividade global da cadeia brasileira de gás natural como combustível fica prejudicada. Apesar dos desequilíbrios de preços no Brasil, entendemos que os fundamentos de longo prazo para o desenvolvimento do setor estão disponíveis, pois a produção nacional é crescente, com perspectiva de disponibilidade de grandes excedentes de gás a partir do pré-sal, bem como as recentes mudanças estratégicas na Petrobras, no sentido de aliar seus preços aos *benchmarks* internacionais, ao invés de eles serem usados por seu controlador, o Governo Federal, como instrumento de controle da inflação. Além disso, a crescente abertura do setor de petróleo e gás no Brasil provê um contexto favorável ao investimento privado, podendo resultar em novos concorrentes no abastecimento e distribuição de gás no Brasil (PORTOS E NAVIOS, 2017). Um exemplo representativo é o da Centrais Elétricas de Sergipe (Celse), que constrói complexo termelétrico de 1.500 MW com terminal de regaseificação flutuante (FSRU) integrado. Será o primeiro do país sem participação da Petrobras. Outras iniciativas semelhantes estão com estudos em diferentes estágios. Um mercado mais competitivo para o gás natural é favorável para o cenário de preços no longo prazo, com reflexos potencialmente positivos no desenvolvimento de seu emprego como combustível de veículos e embarcações.

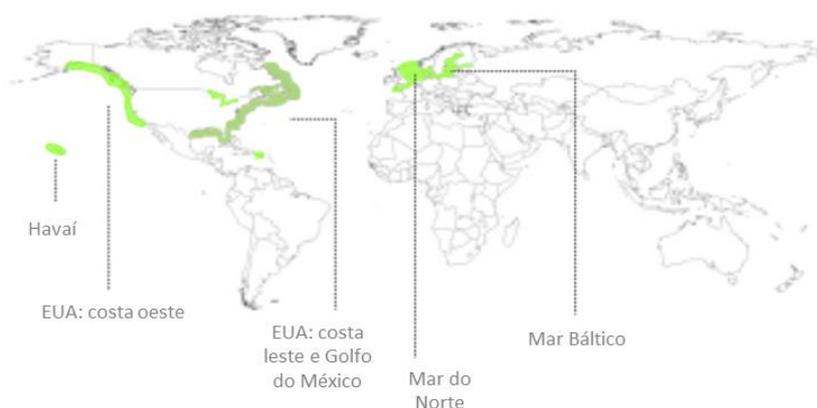
2.2.3 Regulação de emissões

O constante aumento dos problemas ambientais e de saúde pública associados às emissões de gases poluentes emitidos por motores a combustão tem levado os países a estabelecer uma regulação cada vez mais rígida sobre a indústria de transportes. Os materiais particulados, os óxidos de enxofre (SO_x) e os óxidos de nitrogênio (NO_x) estão relacionados a uma longa lista de danos, como a chuva ácida e diversas doenças respiratórias. Nas cidades costeiras, estima-se que milhares de mortes são anualmente causadas por emissões da frota mundial de navios. Por isso, é premente a necessidade de estudar adequadamente o impacto da navegação na qualidade do ar (ZHANG et al., 2017; VIANA et al., 2014; MULLIGAN & LOMBARDO, 2006).

Nesse contexto, a IMO tem adicionado limites mais duros para emissões dentro do Anexo 6 da MARPOL 73/78 (Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios). O Anexo 6 reconhece, em primeiro lugar, duas Áreas de Controle de Emissões (*Emission Control Areas, ECA's*) nas zonas costeiras da América do Norte e duas na Europa (ver

Figura 4). Nessas áreas, aplicam-se regras mais rígidas do que no resto do mundo. Para os óxidos de nitrogênio, desde 2011 aplicam-se limites globais de emissões de acordo com a potência do motor do navio, e desde 2016 limites ainda mais rígidos foram aplicados para as ECA's americanas, também conhecidos como “*Tier III*”. Para emissões de óxidos de enxofre, a partir de 2020 estará estabelecido um limite de conteúdo de enxofre nos combustíveis de 0,1% em massa para todas as ECA's e 0,5% em massa para o resto do mundo.

Figura 4 – Áreas de Controle de Emissões, ECA's

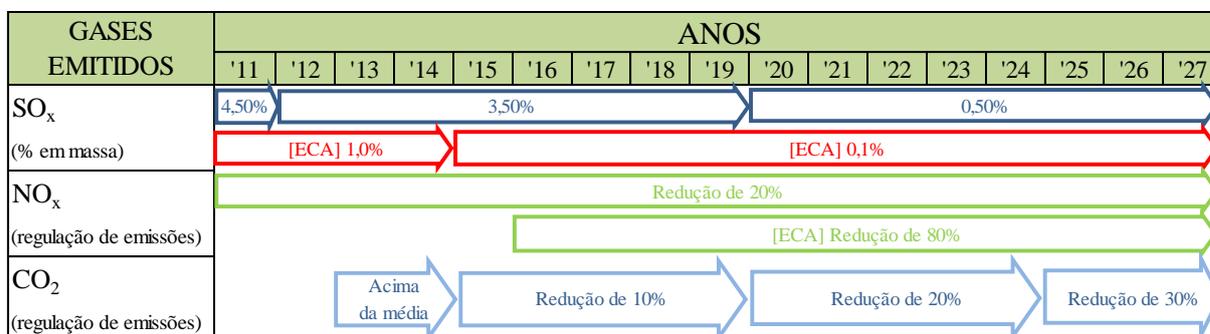


Fonte: Adaptado de SGMF, 2014

Adicionalmente aos gases poluentes, tem amadurecido a discussão sobre os gases causadores do efeito estufa (*greenhouse gases, GHG's*). Apesar de que ainda não houve um acordo global sobre como serão implementados limites para as emissões desses gases, dentre os quais se destacam o CO₂ e o CH₄, a expectativa é que até 2020 haja uma regulação global nesse sentido sob os auspícios da IMO. Hoje, a navegação mercante é o único setor de transporte que ainda não possui regras limitantes para GHG's, tendo ficado fora do acordo de Paris de 2015, embora seja responsável por aproximadamente 2,33% das emissões globais de CO₂ (IMO, 2015-b).

A Figura 5 consolida a evolução das regulações de emissões da IMO, incluindo novas restrições que entrarão em vigor no futuro.

Figura 5 – Evolução das regulações de emissões da IMO



Fonte: Adaptado de Port of Yokohama, 2016

A consequência direta dessas rígidas novas restrições é que, para cumprir a legislação, os armadores precisarão se adequar. Há diferentes estratégias de adequação, cada qual com seus diferentes custos e riscos associados. A atratividade do uso do gás natural em propulsão naval reside no fato de que ele permite ao navio a adequação tanto para GHG's, NO_x e SO_x ao mesmo tempo, a um custo potencialmente competitivo (GE & WANG, 2017). No entanto, é preciso ressaltar que o gás natural pode ter um efeito danoso ao meio ambiente devido ao “vazamento de gás” (*methane leakage*) ao longo do processo de produção e distribuição. Além disso, em sistemas *dual-fuel*, especialmente em baixas rotações, o metano pode não queimar totalmente durante a combustão no motor. Esse fenômeno, conhecido como “escape de metano” ou *methane slip* deve ser tratado com extremo cuidado, pois o CH₄ capta mais de 21 vezes mais os raios ultravioletas em relação ao CO₂. Esses efeitos combinados agravam proporcionalmente muito mais o efeito estufa do que a redução usualmente estimada de 20% das emissões de CO₂ quando utiliza-se o GNL no lugar dos combustíveis marítimos tradicionais. Thomsom, Corbett & Winebrake (2015) aplicaram o método comparativo TWP (*technology warming potential*) para a cadeia do gás “do poço à bomba”, reafirmando que de fato o GNL fornece um saldo ambiental positivo, mas deve-se sempre atentar com cuidado para uma avaliação de todo o ciclo de produção do gás. A mesma conclusão foi obtida por Anderson et al. (2015), ao medirem as emissões do *ferryboat* de grande porte propellido a gás natural “*Viking Grace*”.

Muitos armadores têm convertido suas frotas para gás natural e diversos estudos acadêmicos de impacto ambiental associados às ECA's têm sido elaborados (CORBETT et al., 2014; LOWELL, 2013; NIJBOER, 2010; PAPADOPOULOU & ANTONIOU, 2014; VIANA et al., 2014). Um armador que opere em ECA's tem outras alternativas além do gás

natural, como utilizar diesel com baixo teor de enxofre ou instalar catalisadores (*scrubbers*) no sistema de exaustão, mas o gás natural – especialmente o GNL – tem sido a opção mais vantajosa em diversos cenários (BRYNOLF et al., 2014-a, BRYNOLF et al., 2014-b, LLOYDS REGISTER, 2015).

Embora existam diversas iniciativas regionais voltadas à regulação do gás natural como combustível naval, é a IMO a responsável por publicar um código válido mundialmente. Como esse é um assunto ainda relativamente recente, a entidade, após reunião do Comitê de Segurança Marítima (*MSC – Maritime Safety Committee*) em sua 86ª Sessão (2009), publicou as “Diretrizes Interinas de Segurança para Instalações Propulsoras Alimentadas por Gás em Navios” (IMO, 2009). Essas diretrizes, embora não mandatórias, permaneceram como guia de projeto, construção e operação de embarcações propelidas a gás até que a IMO publicasse o Código Internacional para a Segurança de Navios que usem Gases ou outros Combustíveis de Baixo ponto de Fulgor (*International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels -IGF Code*), em 2015. A filosofia básica do documento é estabelecer provisões mandatórias para o arranjo, instalação, controle e monitoramento de máquinas, equipamentos e sistemas que usem combustíveis de baixo ponto de fulgor (como o gás natural) para minimizar o risco à embarcação, a sua tripulação e ao meio ambiente. Antes do *IGF Code*, havia grande incerteza regulatória sobre o uso do gás natural em navios, mas entre 2009 e 2015 houve um importante desenvolvimento de países pioneiros, especialmente os escandinavos, a Holanda, a Alemanha e os EUA. O código foi adotado em 2015 e entrou em vigor para os países signatários a partir de Janeiro de 2017, sendo aplicável tanto a novos navios como a navios convertidos.

2.3. Análise do cenário internacional

Devido às pressões ambientais advindas das novas regulações internacionais e das pressões de mercado vindas de clientes cada vez mais conscientes, a infraestrutura para transporte e distribuição de gás natural tem se expandido sobremaneira, especialmente nos EUA (onde também ocorre um boom de produção de gás em terra), na Europa e no Sudeste Asiático (notadamente Cingapura, Japão, China e Coréia do Sul). Novos gasodutos, terminais de liquefação e regaseificação e terminais para *bunkering* de gás natural têm sido inaugurados continuamente. Com isso, multiplicam-se em diversos países as iniciativas para a expansão do uso do gás natural embarcado (STUER-LAURIDSEN et al., 2010; GERMANISCHER LLOYD, 2013; RAE, 2013). Com o avanço na tecnologia de tanques e de sistemas de injeção

de gás em motores marítimos, a utilização do gás natural em propulsão naval se expandiu sobremaneira, não mais se restringindo ao *boil off gas*, mas chegando também aos navios de suporte oceânico (como navios PSV e AHTS), embarcações militares, *ferryboats*, uma grande variedade de navios mercantes de longo curso e de navegação interior (LIN et al., 2010; LNG MASTERPLAN, 2014). A forma de armazenamento a bordo mais difundida é o gás liquefeito (GNL), devido ao menor espaço de tanques necessário. O GNC também encontra acolhida em algumas aplicações, quando a autonomia exigida é menor. Vernengo e Rizzuto (2014) elaboraram um modelo de síntese para o dimensionamento de uma frota para transporte de GNC, capaz de reduzir substancialmente o tempo de projeto básico das embarcações.

A Europa tem saído na frente na adoção do gás natural, onde há *ferryboats* propelidos a gás há pelo menos 17 anos. A Noruega foi o país pioneiro, contando hoje com mais de 60 embarcações. No mundo, são 117 navios operando e 111 encomendados (DNV GL, 2017). Recentemente, iniciativas transnacionais foram estabelecidas, coordenando atores dos governos, sociedades classificadoras, empresas de equipamentos, empresas de navegação e estaleiros (OEIN, 2014; POSPIECH, 2013). A hidrovia compreendida pelos rios Reno, Main e Danúbio merece especial destaque, onde projetos-piloto têm sido financiados com recursos públicos de pesquisa e desenvolvimento (VAN DER WERF, 2013). Iniciativas coordenadas como essas têm produzido resultados bastante consistentes, com diversas novas embarcações operando tanto experimental como comercialmente.

Seguem, na Figura 6 –, algumas embarcações em projeto ou em operação que já utilizam o gás natural em sua propulsão: *Bergensfjord* (3-A, *ferryboat*), *Bit Viking* (3-B, Navio tanque), *Isla Bella* (3-C, Navio porta-contêiner) e *Harvey Energy* (3-D, PSV).

Figura 6 – Exemplos de embarcações propelidas a gás natural



Fontes: A: Rolls-Royce, 2017; B: Wärtsilä, 2012; C: Piellisch, 2017; D: Harvey Gulf, 2017.

Em navegação de apoio *offshore*, destaca-se a frota do armador *Harvey Gulf International Marine*, primeira empresa a encomendar navios capazes de queimar apenas gás natural (HARVEY GULF, 2017). Além dos PSV's *dual-fuel* (GNL e diesel) *Harvey Energy*, *Harvey Freedom*, *Harvey Liberty* e *Harvey Power*, um centro de abastecimento dedicado foi construído em *Port Fourchon, Louisiana*. Em navegação de transporte de passageiros, destaca-se o navio *Viking Grace*, o maior *ferryboat* a GNL no mundo, que serve a linha Turku-Åland-Estocolmo entre a Finlândia e a Suécia e está em operação desde 2013. Um navio adicional foi encomendado em 2016, com previsão de entrega em 2020 (FAIRPLAY IHS, 2016). Outros *ferryboats* relevantes são a frota da *BC Ferries* do Canadá, que aos poucos está sendo convertida para GNL, o *fast ferry Francisco*, uma das embarcações de passageiros mais rápidas do mundo, que faz a travessia entre Montevideu (Uruguai) e Buenos Aires (Argentina), e o *ro-pax Texelstroom*, da Holanda, entregue em 2016 e que possui sistema *dual-fuel* diesel-GNC associado à geração de energia fotovoltaica a bordo.

Em navegação de transporte de contêineres, destacam-se os navios da TOTE Maritime, dos EUA, e da CMA CGM, da França.

A TOTE Maritime foi o primeiro armador do mundo a encomendar navios porta-contêiner propulidos a GNL. Os navios, chamados *Isla Bella* e *Perla Del Caribe* foram entregues em 2015 e 2016, respectivamente, tendo sido construídos nos EUA para a navegação de cabotagem (*Jones Act*). Ambos possuem motores *dual-fuel* diesel-gás e servem a rota entre Jacksonville, Flórida e San Juan, Porto Rico (PIELLISCH, 2017).

A CMA CGM, por sua vez, um dos 5 maiores armadores mundiais, encomendou os maiores navios do mundo, de 22.000 TEU's, com propulsão *dual-fuel* (GNL ou óleo pesado com baixo teor de enxofre), mostrando o grau de maturidade já atingido na indústria de equipamentos e de abastecimento de gás natural (THE MOTORSHIP, 2017). Os 9 navios consumirão 300.000 toneladas de GNL por ano (MARINE LOG, 2017-a).

Merece destaque a iniciativa de alguns países, liderados pela Noruega (WÄRTSILÄ, 2012) e Alemanha (LNG WORLD NEWS, 2017), de subsidiar a transição aos navios propulidos a gás natural com disponibilidade de recursos públicos ou descontos de impostos. Com isso, o tempo de maturação da indústria é reduzido substancialmente.

No contexto da navegação interior, a aplicação do gás natural se encontra em estágio menos desenvolvido, apesar de iniciativas em curso na Europa e Ásia. A introdução de gás natural como combustível na navegação fluvial é um processo de transição complexo, pois requer ações tomadas em conjunto por diferentes atores.

2.4. Análise do cenário nacional

No Brasil, o gás natural comprimido vem sendo usado desde os anos 70 como combustível veicular (BRASIL ENERGIA, 2015-b), sob o nome de Gás Natural Veicular (GNV). Em propulsão naval, seu uso ainda não foi disseminado, por razões regulatórias, técnicas, econômicas e logísticas (HAÏDAR, 2015).

As limitações regulatórias estão relacionadas à ausência de normas incorporadas à legislação brasileira que regulamentem a instalação de sistemas de propulsão naval que utilizem o gás natural como combustível. De fato, o emprego desse combustível é proibido na navegação interior pela Diretoria de Portos e Costas (DPC) da Marinha do Brasil, de acordo com a NORMAM-02/2005, pois apresenta ponto de fulgor abaixo de 60 °C. É preciso atualizar tanto a NORMAM-02 como sua correlata para navegação em mar aberto (NORMAM-01), incluindo capítulos que viabilizem o uso do gás natural e de outros combustíveis de baixo ponto de fulgor. Para tanto, caberia uma verificação e revisão das normas brasileiras relacionadas (instalações mecânicas, instalações de GNV, motores para geração termelétrica, etc.), a fim de acomodar a nova realidade do gás natural como combustível embarcado. Além disso, as principais Sociedades Classificadoras do mundo já publicaram regras atualizadas para embarcações propelidas a gás natural (BUREAU VERITAS, 2011; AMERICAN BUREAU OF SHIPPING, 2011). Deve-se destacar também uma lista de normas pertinentes (LNG ADVISORY GROUP, 2013), recentemente catalogadas pela SIGTTO (*The Society of International Gas Carrier and Terminal Operators*) e pela SGMF (*The Society for Gas as a Marine Fuel*).

Apesar do *IGF Code* ter sido publicado em 2015 e antes dele já haver as Diretrizes Provisórias de 2009 (IMO, 2009; IMO, 2015-a), não há indicação ainda de que o código internacional será incorporado às Normas da Autoridade Marítima brasileira. Além disso, não há no Brasil ainda limites de emissões semelhantes àqueles adotados por diversos países, como aqueles que estabeleceram ECA's. Até mesmo a aplicabilidade dos limites de enxofre de 2020 da IMO nas Águas Jurisdicionais Brasileiras (AJB) segue incerta. Não há normas da Marinha do Brasil, IBAMA, ANTAQ ou ANP impondo limites de emissões para especificamente para embarcações. Sem a intervenção regulatória, o desenvolvimento do gás natural como combustível tenderá a ser muito mais lento. O exemplo mais eloquente é da Noruega que, ao implementar uma taxa sobre os NO_x, acabou fomentando de forma pioneira o desenvolvimento de uma indústria de equipamentos e serviços que hoje é líder no setor de abastecimento com gás natural. Uma das necessidades do setor no Brasil é, portanto, absorver

o conjunto citado de normas e experiências operacionais internacionais e articulá-los com a realidade regional, redigindo assim normas atualizadas autóctones. Ao menos algum avanço já tem ocorrido do ponto de vista regulatório. A ANP nos últimos anos publicou resoluções (ANP, 2008; ANP, 2015) que regulamentam instalações de gás natural para veículos e produção de energia, bem como a própria produção do gás a partir de fontes renováveis (o chamado biometano). Por ter potencial de gerar gás natural em regiões próximas do consumo, o biometano tem potencial de impactar positivamente o mercado de gás natural em embarcações, mas ainda apenas num cenário de longo prazo.

As limitações técnicas dizem respeito especialmente aos tanques de armazenamento do gás natural, a certas condições operacionais e à escassez de motores capazes de queimar gás. Esses desafios não se restringem apenas ao Brasil e serão discutidos em maior detalhe no item 2.7.

As limitações econômicas dizem respeito ao preço do gás natural no Brasil, que não acompanha diretamente o preço internacional e está sujeito a um monopólio logístico, pois todos os gasodutos do país são controlados pela Petrobras, como já citado anteriormente. No Brasil, porém, o intervencionismo estatal tem criado dificuldades para o avanço no setor de gás natural. Entretanto, como especificamente no Amazonas os preços de todos os combustíveis são bastante elevados, o preço e a alta disponibilidade do gás natural fazem que ele seja competitivo, especialmente quando comparado ao diesel.

Finalmente, limitações logísticas também tem atrasado o desenvolvimento do gás natural na navegação amazônica. Essas limitações dizem respeito à indisponibilidade de sistemas de abastecimento de gás natural para as embarcações, o que de certa forma é um fenômeno global, pois essa é uma indústria consideravelmente nova. Potenciais investidores não constroem a infraestrutura, pois ainda não há embarcações que disponham de equipamentos para processar o gás natural (motores, tanques, tubulação, etc.). Já os armadores hesitam em investir nas embarcações, pois não há infraestrutura. Ou seja, um clássico já mencionado impasse do tipo “quem vem primeiro: o ovo ou a galinha”? Assim como ocorreu na adoção de novos combustíveis no passado (como na transição do carvão para os derivados de petróleo e agora na transição para veículos elétricos), são necessárias iniciativas coordenadas tanto para disponibilizar equipamentos e embarcações adequadas, como também para prover a infraestrutura logística.

Apesar de todas as limitações descritas acima, podemos destacar duas iniciativas que nos últimos 10 anos buscaram aplicar o gás natural como combustível marítimo no Brasil.

A primeira experiência foi o *ferryboat* “Ivete Sangalo” (Figura 7), lançado em Agosto de 2008 pela TWB Construção Naval de Santa Catarina para operação na travessia Salvador – Itaparica, na Bahia (REVISTA ELO, 2008; G1 RIO, 2008). O *ferryboat* foi equipado com quatro motores Caterpillar de 600 HP cada um, todos bicompostíveis diesel-gás natural. Além do fabricante de motores por meio de seu representante (Sotreq), foram envolvidos no projeto também a DNV, a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), a Petrobras e a Bahiagás. Os gás era armazenado a bordo na forma de CNG. Porém, devido a problemas com a disponibilidade de fornecimento do gás, o sistema acabou não sendo utilizado e a embarcação opera até hoje, mas apenas queimando diesel.

Figura 7 – Ferryboat “Ivete Sangalo”



Fonte: G1 Rio, 2008

A segunda experiência ocorreu entre 2014 e 2015, quando a Transportes Bertolini Ltda. converteu para testes o empurrador fluvial “Bertolini LXXVI” (Figura 8) para propulsão também *dual-fuel*. A responsabilidade da execução foi contratada à Bertolini Construção Naval (Beconal), de Manaus (AM) e coordenada pelo autor deste trabalho, sob o comando da gerência industrial. O empurrador teve seu motor Cummins de 600 HP convertido para operação diesel-gás, com a participação das companhias Convergás, Bosch Engineering, Ecometano/CDGN, Cigás e supervisão da Diretoria de Portos e Costas da Marinha do Brasil. Por não haver espaço a bordo, para armazenamento do GNC foram usadas duas carretas de 5.000 Nm³ de gás natural, posicionadas sobre o convés da balsa carreteira (*deck*). O conjunto empurrador – balsa normalmente opera com 35 carretas, mas para a viagem de teste entre Manaus e Belém, dois *slots* foram ocupados pelas carretas. Os testes foram bem-sucedidos tecnicamente, tendo sido obtida taxa de substituição semelhante à experiência do “Ivete Sangalo” 6 anos antes e semelhante à prática usual do mercado: 70% gás natural e 30% diesel.

Porém, não houve à época viabilidade econômica para o prosseguimento dos estudos, que poderiam incluir embarcações novas GNC ou GNL. Entre outros motivos, um dos principais foi a falta de infraestrutura de pressurização do gás (até a pressão do GNC, 250 bar) ou liquefação (à $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$, no caso do GNL). Ou seja, não havia ainda a rede de abastecimento, que poderia incluir as plantas de GNC e/ou GNL, associados a terminais de atracação, caminhões ou balsas de abastecimento.

Figura 8 – Arranjo de testes do empurrador Bertolini LXXVI



Fonte: Autor

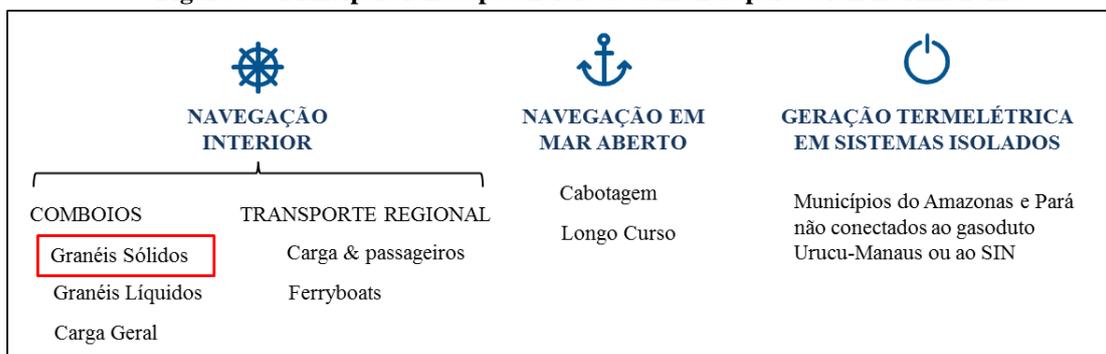
Cabe, portanto, a pergunta: por que os armadores da região norte ainda não estão investindo em embarcações propelidas a gás? A resposta só poderia ser dada com rigor a partir de pesquisa estruturada qualitativa com questionário a ser aplicado aos principais operadores da região e, por não ser parte do escopo deste trabalho, fica como sugestão de pesquisas futuras. Porém, como as duas experiências existentes até hoje no país mostram, certamente a falta de infraestrutura adequada de abastecimento será parte importante da razão. A menos que um armador grande o suficiente construa a infraestrutura por si próprio, ou organize um consórcio de interessados, não haverá progressos substanciais. Se houver iniciativas além dos armadores, por empresas de distribuição de combustíveis, ou de serviços de *bunkering* ou de investimentos públicos, pode ser aberto um novo caminho. Finalmente, o Estado (em nível estadual ou federal) poderia fornecer subsídios para a construção de infraestrutura, de maneira semelhante ao que é feito em países como a Noruega e a Alemanha.

2.5. Demanda potencial na Amazônia Brasileira

Há mais de 25 anos existem planos para o emprego do gás natural na navegação amazônica, pois sempre foi evidente que as reservas de Urucu eram muito maiores que a capacidade local de consumo do gás. Um relatório interministerial (COMISSÃO MME, 1995) encomendado em 1995, primeiro ano do governo FHC, já apontava o emprego de balsas para transporte de gás natural liquefeito como solução promissora para sistemas elétricos isolados, incluindo, à época, os estados de Amapá, Roraima, Rondônia e Acre. Posteriormente, outro trabalho bastante detalhado apontava as perspectivas de uso de GNL para abastecimento do parque termelétrico de cidades do interior do Amazonas (KUWAHARA, 1999).

A Figura 9 ilustra os setores potenciais de demanda na região amazônica para GNL transportado por embarcações. Foram excluídos a demanda de GNV, industrial, comercial e residencial de Manaus. Esses segmentos, chamados “não-térmicos”, correspondem somados, em Novembro de 2017, a 2,5% do consumo de gás natural do Amazonas, o que significa 108.739 m³/dia em relação a 4.359.094 m³/dia (CIGÁS, 2017). Embora pequena, não é uma quantidade irrelevante, mas o suprimento é feito por gasodutos urbanos (industrial, comercial e residencial) ou postos de gasolina (GNV). Portanto, não há perspectiva para emprego do GNL. O mesmo se aplica ao segmento térmico já atendido por gasodutos: são 4 usinas no interior do Amazonas (Anamã, Anori, Caapiranga e Codajás), 7 usinas operacionais em Manaus (Manauara, Tambaqui, Jaraqui, Aparecida, Mauá, Cristiano Rocha e Ponta Negra), e uma oitava (Mauá 3), que será a maior de todas, consumindo 2,3 milhões de m³ de gás para uma potência aproximada de 520 MW. Ainda sem Mauá operando a pleno vapor, essas usinas são responsáveis por 97,5% da demanda atual, porcentagem que deverá subir.

Figura 9 – Principais fontes potenciais de demanda para GNL na Amazônia



Fonte: Autor

No entanto, as perspectivas são bastante positivas para Navegação Interior, Navegação em Mar Aberto e em Geração Termelétrica de Sistemas Isolados.

A demanda tradicional por combustíveis navais na navegação fluvial da Bacia Amazônica se concentra nos rios mais populosos: Negro, Solimões, Madeira, Tapajós e Amazonas e, em menor escala, nos rios Juruá, Purus, Tocantins e Xingu.

O transporte de distribuição de combustíveis e demais granéis líquidos possui grande relevância, com origem na Refinaria de Manaus e destino em praticamente para toda a região norte. Há também um fluxo considerável de comboios de carga geral entre Belém e Manaus por comboios de uma ou duas balsas (*ro-ro* caboclo).

O transporte regional, formado principalmente por embarcações mistas de carga e passageiros e *ferryboats* (de travessia ou de viagens longas), mereceria atenção para sua potencial demanda de gás natural no futuro, possivelmente GNC.

A navegação de cabotagem e de longo curso demanda uma quantidade muito grande de combustível, mas a adoção de GNL em portos da região norte demandaria a disponibilidade de gás em outros pontos do Atlântico Sul, o que hoje não existe. De qualquer forma, recomenda-se a análise de demanda potencial para gás natural em outros terminais de exportação da Região Norte: Juruti, Porto Trombetas e Belém (Miramar), todos no Pará.

Finalmente, a geração termelétrica em sistemas isolados poderia representar uma demanda adicional interessante por GNL. Embora considerando pontos de demanda que hoje já são atendidos pelo gasoduto de Urucu e por conexões ao Sistema Interligado Nacional (SIN), o trabalho de Kuwahara (1999) chegou a uma perspectiva de demanda de 2,8 milhões de m³ de gás por dia. Uma atualização desse estudo poderá apontar volumes consideráveis ainda de demanda por GNL para geração de energia em sistemas isolados, possivelmente acima de 1 milhão de m³ de gás por dia. Pontos focais seriam os municípios da calha dos rios Madeira, Solimões e Juruá, distantes do linhão de Tucuruí e suas potenciais ampliações, e também distantes do gasoduto Urucu-Manaus.

Entretanto, uma mudança está em curso no eixo exportador do noroeste brasileiro que provocará um grande aumento na demanda por diesel (MGO), óleo pesado (HFO) e, potencialmente, por gás natural, no futuro. Há alguns anos tem sido desenvolvido o eixo da rodovia BR-364 em conjunto com o Rio Madeira para transportar granéis. Um dos operadores utiliza comboios fluviais para fazer o trajeto de Porto Velho (RO) até Itacoatiara (AM), enquanto outro operador faz o trajeto de Porto Velho a Santarém (PA). Além de um expressivo aumento de tráfego esperado para essa rota, a nova rota viabilizada pela rodovia BR-163 (Cuiabá-Santarém) operando em conjunto com o Rio Tapajós está provocando grande

aumento na demanda por diesel e óleo pesado em embarcações no Pará, especialmente nas cidades de Itaituba, Santarém e Belém.

Não obstante a sobra de gás na região norte e a demanda em franco crescimento, o gás atualmente encontra-se disponível apenas em Manaus, ponto final do gasoduto de Urucu. Disponibilizar o gás em outras cidades dependeria de análises técnico-econômicas em relação ao sistema logístico de distribuição e abastecimento, pois serão necessários pesados consideráveis investimentos em terminais, estações de compressão (ou liquefação) e embarcações para transportar o gás (liquefeito ou comprimido). Toda essa infraestrutura logística ainda não existe, o que constitui uma séria restrição ao desenvolvimento do gás natural como combustível naval, mas ao mesmo tempo trata-se também de uma oportunidade para o mercado e para a academia.

Este trabalho irá se concentrar nos comboios fluviais de transporte de granéis sólidos, como destacado em vermelho na Figura 9. Esse é o mercado que mais cresce e que possui armadores com perfil mais voltado a clientes internacionais e usualmente mais exigentes. Ou seja, são armadores mais sujeitos ao comprometimento com um transporte mais sustentável e mais propensos a investir em soluções de maior complexidade, porém com potencial de retorno no médio e longo prazo.

A demanda agregada da navegação, juntamente com os outros mercados descritos, poderia viabilizar plantas maiores de liquefação, que são muito sensíveis a economias de escala (MOKHATAB et al., 2014).

2.6. Oferta do gás natural como combustível na Amazônia

O Amazonas possui a segunda maior reserva provada brasileira de gás natural, sendo a maior do país *onshore* (em terra): a Bacia de Urucu (Figura 10). Dos 14 milhões de m³ médios por dia produzidos em 2016, 60,3% foi reinjetado nos poços devido à sobra de gás no mercado regional (ANP, 2017). De fato, desde a inauguração do gasoduto Urucu-Manaus, em 2009, a sobra de gás natural no Amazonas é aguda e tem até recebido atenção da imprensa local (SEVERIANO, 2015). As projeções futuras, porém, apontam ainda grande folga. A partir de dados da ANP de 2013 (ANP, 2017), verifica-se que as reservas provadas no estado estão 50,5 bilhões de m³. Mantida a demanda atual por gás natural no Amazonas (5,6 milhões de m³/dia) e sem que haja novas descobertas, as reservas permitirão a produção ainda por 25 anos. Esse cenário ainda se mostra conservador, uma vez que há reservas ainda em fase de

exploração nas Bacias do Solimões e do Amazonas (BRASIL ENERGIA, 2014) e uma vastíssima área não pesquisada, o que pode aumentar substancialmente a oferta de gás natural na região.

Figura 10 – Base de produção da Petrobras em Urucu, AM



Fonte: Veja, 2011

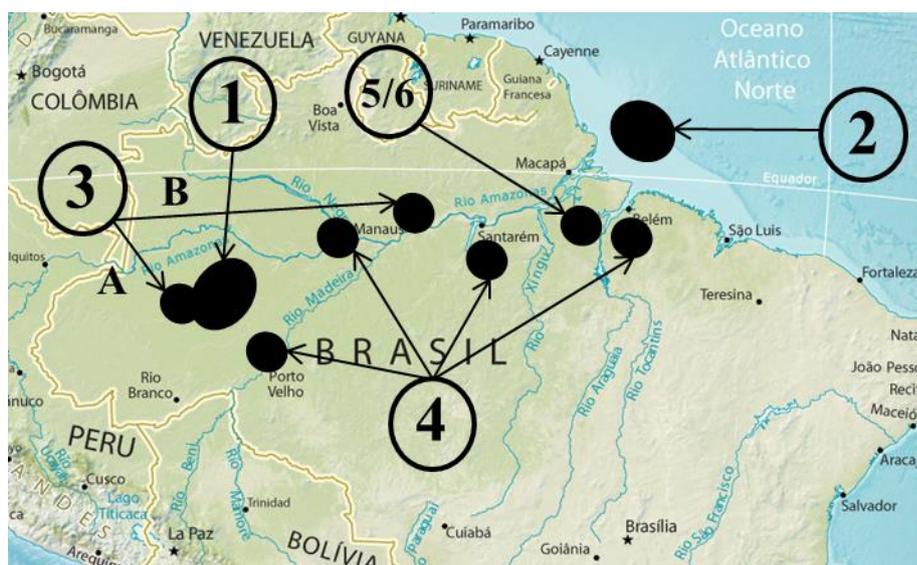
Entretanto, a abundância de gás natural excedente do Amazonas, embora constitua uma oportunidade, ainda está associada a relevantes obstáculos de transporte e distribuição. Hoje, o único mercado relevante atendido é o da cidade de Manaus, onde o gás é consumido principalmente em geração termelétrica, consumo industrial (como matéria-prima ou para geração de energia) e, residualmente, em aplicações comerciais, residenciais e consumo de GNV.

Não há distribuição para os poucos e dispersos centros urbanos do interior do estado, com a exceção dos *citygates* instalados em quatro dos municípios cortados pela gasoduto Urucu-Manaus: Anamá, Anori, Caapiranga e Codajás. Nesses municípios, a geração a óleo combustível foi substituída por gás natural, gerando ganhos ambientais e econômicos.

Não há tampouco distribuição para outras capitais da região norte que poderiam demandar o gás, como Porto Velho (RO), Boa Vista (RR) e Belém (PA). Um eventual sistema de distribuição de GNL para essas capitais poderia ser aproveitado para outros usos, adicionalmente ao abastecimento de embarcações. Esse sistema ainda precisaria ser mais bem estudado e dimensionado, não sendo essa análise parte do escopo deste trabalho. Será considerada apenas como premissa a existência de uma planta de liquefação em Manaus de capacidade tal que atenda à demanda projetada pelo consumo das embarcações.

A produção de Urucu não é, porém, a única fonte possível de gás natural na Região Norte. Outras fontes em diferentes fases de maturidade são descritas a seguir e ilustradas na Figura 11.

Figura 11 – Pontos de potencial oferta de gás natural da Amazônia



Fonte: Veja, 2011

1. Os campos de gás natural no Baixo Juruá descobertos pela então HRT Óleo e Gás (atual PetroRio), posteriormente vendidos à Rosneft, companhia petroleira russa (Figura 11, 1). Tais campos, embora encerrem reservas provadas relevantes, estão localizados em áreas distantes dos centros consumidores. As companhias citadas realizaram extensos estudos de viabilidade nos últimos anos, com o objetivo de monetizar as descobertas, chegando às seguintes alternativas: *Gas to Liquids* (GTL); geração de energia “na cabeça do poço” e posterior transmissão em alta tensão até Manaus (*Gas to Wire*, GTW), com interligação ao SIN (Sistema Interligado Nacional); liquefação “na cabeça do poço” e posterior transporte do GNL por balsas de calado raso pelos rios Juruá e Solimões; transporte por gasoduto até o rio Solimões, com posterior liquefação e transporte do GNL; construção de novo gasoduto até Manaus; e construção de trecho de gasoduto até o gasoduto Urucu-Manaus, com seu uso compartilhado em seguida. Os estudos até aqui não foram capazes de justificar uma operação comercial lucrativa, embora a Rosneft tenha divulgado preferência pelo GNL em 2015 (PAMPLONA, 2015) e pelo GTW em 2016 (CARVALHO, 2017). A principal dificuldade dos sistemas GTW é a obrigatoriedade de remuneração à concessionária distribuidora de gás, mesmo sem que haja contrapartidas proporcionais (MACIEL, 2017). O projeto do Juruá é ainda mais complexo, pois as linhas de transmissão precisariam vencer 790km até Manaus;

2. Os blocos de exploração de alto potencial sísmico na Foz do Amazonas, que encontram-se em fase de estudos de impacto ambiental (Figura 11, 2). O licenciamento ambiental tem sofrido forte oposição do aparato ambientalista nacional e internacional (PACHECO, 2017). A emissão da Licença de Instalação pelo IBAMA permanece incerta, com alta probabilidade de ser negada;
3. Outros blocos de exploração da Petrobras em regiões menos acessíveis, como na Bacia do Amazonas (Campo de Azulão, Figura 11, 3b) e na Bacia do Solimões (Campo de Juruá, Figura 11, 3a). Devido à crise econômica brasileira e à queda do preço do petróleo, a maioria dos blocos com potencial não tiveram progressos relevantes em sua campanha de exploração e foram colocados à venda pela Petrobras em 2017. O Campo de Juruá ainda não foi vendido (PETROBRAS, 2017), mas Azulão foi comprado pela Eneva em Novembro do mesmo ano (PAMPLONA, 2017). A empresa compradora planeja implantar um sistema GTW, o que resulta na indisponibilidade de planos para GNL;
4. Biogás gerado a partir de resíduos agroindustriais (como a vinhaça ou excrementos tratados avícolas e suínos) e urbanos (aterros sanitários). Apesar de serem alternativas interessantes sob a ótica ambiental (BRASIL ENERGIA, 2015-b), ainda não há justificativa econômica ou escala industrial suficiente na região norte para o biogás. As cidades candidatas (Figura 11, 4) seriam justamente as maiores: Porto Velho, Manaus, Santarém e Belém;
5. A potencial disponibilidade de GNL a partir de seu transporte por navios metaneiros projetados para trazer gás importado ou distribuir gás a partir dos *hubs* nordestinos de Pecém (CE) e Salvador (BA), onde já existem terminais operacionais (Figura 11, 5/6);
6. A potencial disponibilidade de um terminal regaseificador de GNL na região de Barcarena, Pará (Figura 11, 5/6), para atendimento a demandas industriais de refino da bauxita e da alumina, bem como para geração termelétrica. Embora ainda não estejam implementadas, ambas as aplicações encontram-se com tratativas avançadas. Um Memorando de Entendimentos já foi assinado entre a Hydro Alunorte e a Shell para a realização de estudos mais aprofundados para a disponibilização de gás natural na refinaria de alumina em Barcarena, nos processos de calcinação e geração de vapor (HYDRO, 2017). O gás natural seria fornecido pela Shell como GNL a partir de uma FSRU, em Barcarena. Já a geração elétrica está sendo estudada pelas companhias ExxonMobil, Golar LNG

e GenPower (DE JESUS, 2016). A potência da UTE projetada faria dela uma das maiores do Brasil, com 1.280 MW instalados (GENPOWER, 2016). O fornecimento também seria via terminal de GNL.

Como será visto mais adiante no Capítulo 4, pode-se considerar esta última fonte como altamente provável de estar disponível nos próximos 5 anos (até 2022), especialmente se os consórcios envolvidos conseguirem unificar seus estudos na concretização de apenas um terminal FSRU. Por isso, Barcarena poderá no futuro ser também considerada como ponto de oferta de GNL para embarcações, adicionalmente ao gás já disponível em Manaus.

2.7. Infraestrutura para transporte e abastecimento

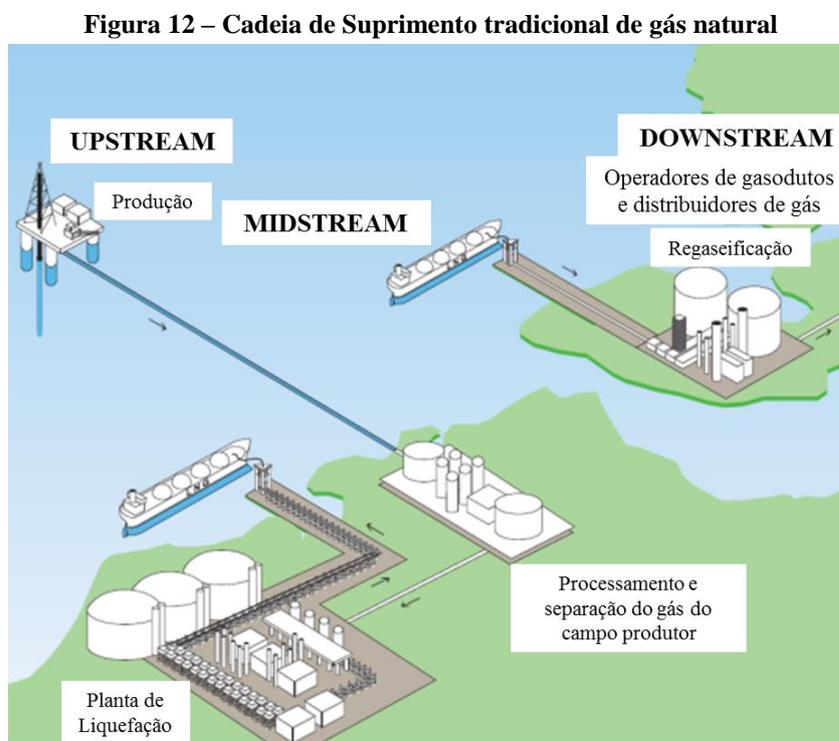
A infraestrutura necessária para a disponibilização do gás natural do poço produtor até o consumidor final tem mudado bastante nas últimas décadas, com grandes desenvolvimentos nos últimos 10 anos. A seguir os principais aspectos dessa infraestrutura serão brevemente descritos.

2.7.1 A cadeia de suprimento de gás natural

A cadeia de suprimento tradicional de gás natural está representada na Figura 12. O gás natural é produzido (associado ao petróleo ou não associado, em sistemas exclusivos de gás) em campos em terra ou em plataformas *offshore*, como indicado na figura. O conjunto de atividades atreladas à produção do gás é também chamado de mercado *Upstream*, por estar à montante da cadeia de suprimento. O gás é então transportado a plantas de processamento em terra, que farão o pré-tratamento e sua separação de líquidos e impurezas, como H₂S e CO₂ (MOKHATAB et al., 2014). Alguns líquidos, como o condensado de gás natural, possuem valor comercial e são separados para outros usos.

O transporte entre as estruturas de produção e as plantas de tratamento geralmente é feito por gasodutos (submarinos, enterrados ou aéreos), mas se o campo produtor *offshore* for muito grande e estiver muito afastado da costa, poderá ser mais viável economicamente o emprego de uma plataforma flutuante que processe e liquefaça o gás natural. Essas plataformas são conhecidas como FLNG (*Floating Liquefied Natural Gas*). A maior estrutura flutuante já construída pelo homem, a plataforma *Prelude FLNG*, é um exemplo relevante

dessa solução (Figura 13). Usualmente, porém, as estruturas de processamento e liquefação são instaladas em terra.



Fonte: Adaptado de Regan, 2017.

A liquefação é necessária para o transporte do gás natural até os consumidores em grandes distâncias, principalmente entre continentes. Ainda assim, a maior parte do gás é movimentada por gasodutos. Hoje, 70% do volume global de gás natural é transportado por gasodutos, sendo os 30% restantes por GNL (MOKHATAB et al., 2014).

Figura 13 – Prelude FLNG



Fonte: Shell, 2015

Na planta de liquefação, o gás é novamente tratado segundo as especificações do cliente e resfriado até $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$, tendo seu volume reduzido em 600 vezes. Após o transporte por navios metaneiros (conhecido como o mercado *Midstream*), o gás precisará ser recebido e

regaseificado, para distribuição final aos consumidores (mercado *Downstream*). O recebimento poderá ser feito num terminal em terra ou em um navio convertido para Unidade Flutuante de Armazenamento e Regaseificação (Floating Storage Regasification Unit, FSRU). A Figura 14 mostra o terminal flutuante de GNL em operação pela Petrobras no Porto de Pecém, Ceará. À direita, encontra-se o navio FSRU; à esquerda, um metaneiro descarrega o GNL importado.

Figura 14 – FSRU de Pecém, no Ceará



Fonte: Petronoticias, 2012

Como se pode notar, a cadeia de suprimento tradicional do gás natural possui elos interdependentes entre si e consideravelmente intensivos em capital. Os participantes do mercado buscam, portanto, cada vez mais operar um sistema integrado sob seu controle, para minimizar riscos, interrupções e custos (REGAN, 2017).

2.7.2 Gás Natural Liquefeito de Pequeno Porte

Uma nova indústria, porém, está amadurecendo nos últimos anos. Com o aparecimento de pontos de demanda cada vez mais distribuídos e de menor porte, faz-se necessária uma infraestrutura para o Gás Natural Liquefeito de Pequeno Porte (*Small Scale LNG*, SSNLG). Embora o acrônimo em inglês já esteja popularizado, é conveniente adotar uma sigla análoga em Português: GNL-PP.

Esses sistemas possuem capacidades de até 1 milhão de toneladas de GNL por ano (MTPA, na sigla em inglês) e servem a consumidores distribuídos de menor porte e localizados em regiões mais distantes de infraestrutura. Sem os sistemas SSLNG, esses consumidores não teriam acesso ao gás natural, pois o alto investimento necessário para a construção de gasodutos não se justificaria (INTERNATIONAL GAS UNION, 2015-a). Conseqüentemente, a infraestrutura regional fica fortalecida, especialmente no interior de

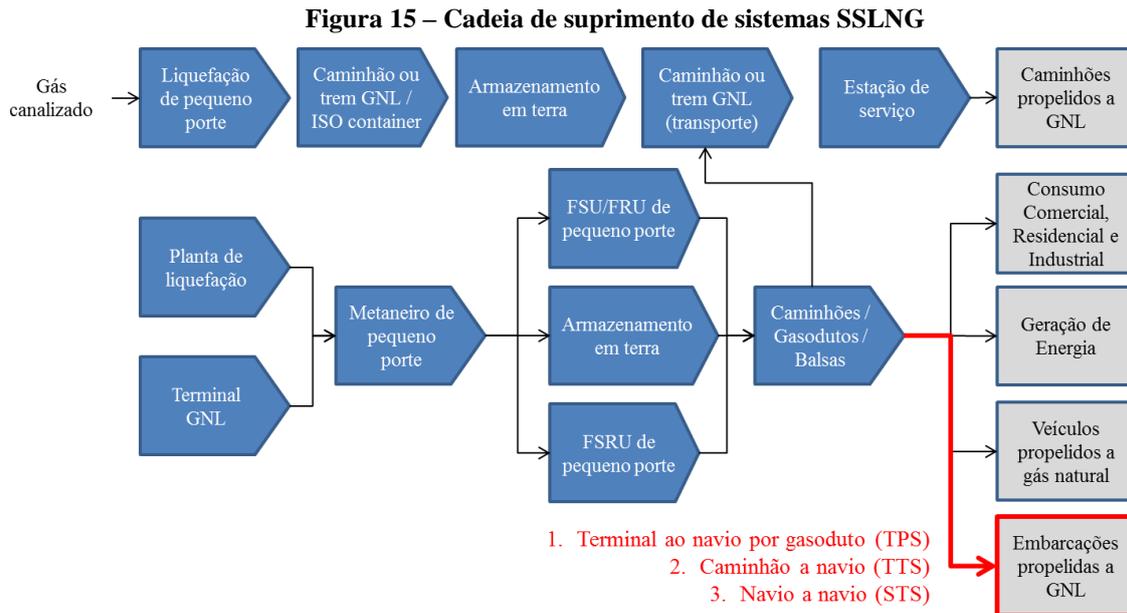
cada país, e fomenta-se o maior consumo de gás natural. O mercado se pulveriza tanto do lado do consumo como do lado da oferta, pois sistemas menores passam a ser fornecidos também por novos fornecedores de equipamentos (REGAN, 2017).

Os sistemas SSNLG têm se desenvolvido especialmente na América do Norte, na Europa e na Ásia. Eles podem ter capacidade tão pequena como 20 toneladas de GNL por dia (0,0073 MTPA), até 3.000 toneladas por dia (1,1 MTPA). Para efeito de comparação, o maior sistema de GNL do mundo, o *Ras Laffan Industrial City* do Qatar, possui uma capacidade de 77 MTPA de GNL (INTERNATIONAL GAS UNION, 2015-b). A maior parte dos sistemas convencionais possui capacidade de 3 a 7 MTPA de GNL (MOKHATAB et al., 2014). Quanto aos navios usados no transporte do GNL, os sistemas convencionais de transporte entre continentes usam embarcações cada vez maiores. Os maiores navios metaneiros do mundo, também pertencentes ao Qatar, são a classe Q-Max, com capacidade de 244.000 m³ de GNL, enquanto o tamanho médio dos navios usualmente é de aproximadamente 145.000 m³ de GNL (REGAN, 2017). Já nos navios empregados em sistemas SSLNG (metaneiros de pequeno porte), a capacidade de transporte costuma variar entre 5.000 m³ e 30.000 m³ (INTERNATIONAL GAS UNION, 2015-b).

A capacidade mundial total instalada de sistemas SSLNG em 2015 estava próxima de 20 MTPA, dividida em mais de 100 instalações, o que significa pouco mais de 6,5% da capacidade de liquefação convencional mundial, que somava 300 MTPA (INTERNATIONAL GAS UNION, 2015-b).

A cadeia de suprimento de sistemas SSLNG está ilustrada na Figura 15. O gás, após ser liquefeito, pode ser transportado por meios rodoviários, ferroviários ou aquaviários, com armazenamento e regaseificação em terra ou flutuante.

A distribuição final (última coluna da direita) poderá ser feita por estação de serviço em terra ou por abastecimento feito com entrega diretamente ao consumidor final. Existe também uma forma mista de abastecimento, chamada LCNG (*Liquefied-Compressed Natural Gas*), que nada mais é que o abastecimento de GNC a partir de tanques de GNL, dispensando assim a necessidade de equipamentos de regaseificação a bordo. Assim, estações LCNG são capazes de fornecer o abastecimento tanto de GNC como de GNL.



Fonte: Adaptado de Regan, 2017.

Merece citação a única planta de liquefação brasileira, que é justamente um sistema GNL-PP. Localizada em Paulínia, SP, e inaugurada em 2006, é controlada pela GásLocal, uma *joint venture* entre Petrobras (40%) e White Martins (60%). A planta tem capacidade de liquefazer 440 mil m³ de gás por dia, resultando numa capacidade de 0,27 MTPA de GNL. Esse gás é distribuído por caminhão para clientes distantes até mesmo algumas centenas de quilômetros. A planta tem, porém, enfrentado um “imbróglia administrativo-regulatório-judicial” de resolução bastante complexa, devido ao arcabouço regulatório brasileiro que confere monopólio de distribuição às concessionárias estaduais (ROMEIRO, 2016). A planta da GásLocal, portanto, ainda não conseguiu se firmar o bastante para servir de referência ao florescimento de outras estruturas semelhantes no país.

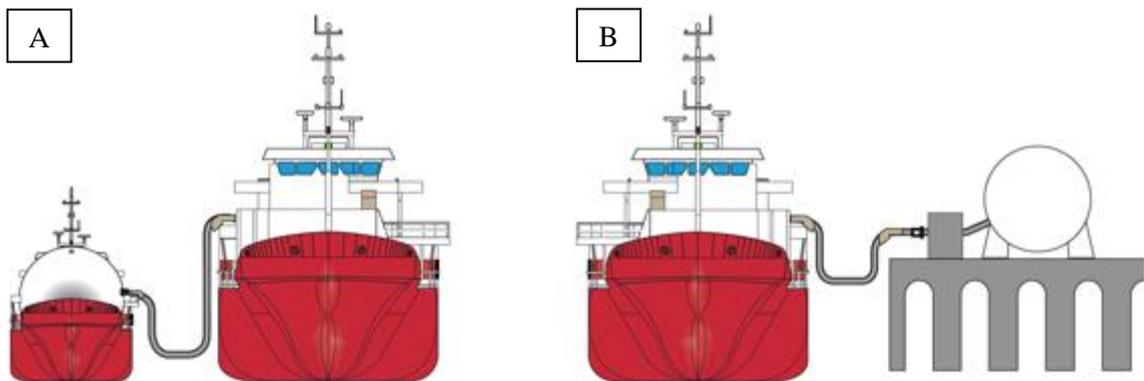
2.7.3 Sistemas de Abastecimento de GNL em navios

A entrega do GNL normalmente ocorrerá por caminhões, mas para o uso do gás natural como combustível em embarcações, há três alternativas, destacadas em vermelho na figura por ser esse o enfoque do presente estudo.

1. Terminal ao navio por gasoduto (*Terminal to ship via pipeline, TPS*): nesse caso, deverá ser construída uma estrutura em terra para atracação do navio a ser abastecido. Esse terminal deverá contar com tanques para armazenamento e condições de acesso adequado às embarcações a serem abastecidas (Figura 16-B);

2. Caminhão a navio (*Truck to ship, TTS*): utilizam usualmente o próprio terminal de operações das embarcações a serem abastecidas, ao invés da necessidade de uso de um terminal dedicado. Caminhões conectam-se à embarcação e transferem o GNL para seus tanques de armazenamento (Figura 17);
3. Navio a navio (*Ship to ship, STS*): uma embarcação, que pode ser um navio ou balsa tanque (*bunkering ship* ou *bunkering barge*) é empregada para abastecer as demais embarcações. Essa embarcação de abastecimento deverá ser carregada num terminal de GNL, podendo ser o próprio terminal de liquefação ou apenas uma planta de armazenamento. Com isso, essa embarcação terá liberdade de ir até onde os navios a serem abastecidos estão, seja a poucos quilômetros ou até a centenas de quilômetros (Figura 16-A).

Figura 16 – Operações STS (A) e TPS (B)



Fonte: KLAW LNG, 2017.

Figura 17 – Operação TTS



Fonte: THE MARITIME EXECUTIVE, 2013.

Uma variação dos métodos citados é o abastecimento modular, que pode ser empregado em todos eles. Ao invés do GNL ser transferido por tubulação flexível diretamente para os tanques dos navios, ele pode ser armazenado em contêineres ou em tanques sobre *skids*, sendo em seguida posicionado sobre o convés. Finalmente, o módulo de GNL é então conectado à rede de combustível do navio. Um exemplo é o LNGTainer (Figura 18). Esse conceito pode ser também verificado na proa da balsa da Figura 23.

À medida que os sistemas de abastecimento com GNL se tornam mais difundidos, estudos e guias de procedimentos começam a aparecer. As sociedades classificadoras, por seu conhecimento técnico, tem se destacado com contribuições importantes (AMERICAN BUREAU OF SHIPPING, 2014; DNV GL, 2014).

Figura 18 – LNGTainer: exemplo de sistema de abastecimento modular



Fonte: LNGTainer, 2017.

Para emprego na Amazônia brasileira, em que atualmente a disponibilidade de vias navegáveis fornece muito maior capilaridade operacional do que as rodovias, os métodos TTS tendem a ser preteridos. Entre um sistema de abastecimento TPS e STS, o presente estudo considerará apenas o sistema STS, devido à sua maior modularidade, flexibilidade operacional e condição de cobrir vastas áreas territoriais (CALDERÓN et al., 2016), como é o caso da região amazônica.

Deve-se, entretanto, atentar para o fato de que sistemas SSLNG, por serem menores, reduzem-se em preços usualmente maiores por m³ de gás do que sistemas de grande porte, devido à falta de economias de escala. Porém, à medida que as tecnologias compactas evoluem, incluindo padronização e modularização, a competitividade de tais sistemas tende a aumentar (REGAN, 2017).

2.7.4 Sistemas de armazenamento a bordo

Para o gás natural comprimido, os tanques devem suportar altas pressões e ocupam um espaço excessivo: até 5 vezes mais espaço que um tanque diesel equivalente (MACHADO et al., 2007). Além disso, geralmente seu peso é muito elevado, pois é preciso garantir a integridade estrutural mesmo a pressões tão altas como 250 bar. Existem soluções comerciais para tanques de GNC construídos com materiais leves (fibra de carbono, por exemplo), mas seu custo é mais elevado. No caso do gás natural liquefeito, a necessidade de espaço é menor (embora ainda requeira aproximadamente o dobro do espaço de um tanque diesel equivalente), mas as baixas temperaturas demandam tanques criogênicos, de alto custo de construção (DNV, 2012).

Diversas condições operacionais do gás natural precisam ser tratadas com muito cuidado do ponto de vista da segurança. Tanques pressurizados de GNC são um fator relevante de risco (SEMIN, 2008) e vazamentos de gás liquefeito podem causar incêndios perigosos (FAY, 2003; FAY, 2007; LEHR & SIMECEK-BEATTY, 2014). Há também desafios no desenvolvimento de materiais adequados para operações cíclicas a baixas temperaturas (KIM et al., 2012). Ainda assim, o histórico de acidentes com embarcações propelidas a gás natural é bastante favorável (SILVA, 2013).

2.7.5 Motores, geradores e equipamentos auxiliares

Motores diesel são os mais fortes candidatos a conversão para sistemas *dual fuel* (diesel e gás). Já embarcações de maior potência podem ser substituídas por outras construídas já com motores 100% a gás, que trabalham no ciclo Otto. Para embarcações de grandes potências não há restrições quanto à disponibilidade de motores exclusivamente a gás ou no modelo *dual fuel*. Entretanto, as embarcações engajadas na navegação interior apresentam potência que raramente ultrapassa 6000 HP, sendo que a maior parte da frota usa motores abaixo de 1000 HP. Para essa faixa de potência, a disponibilidade de equipamentos é menor e portanto a falta de motores a gás ainda é um gargalo relevante. Esse cenário está mudando, porém, pois diversos fabricantes estão desenvolvendo novos motores ou produzindo kits de conversão para seus motores a diesel existentes. Essa é uma das razões pelas quais este trabalho focará em empurradores fluviais de maior potência.

De maneira geral pode-se afirmar que nas últimas décadas tem havido sensível desenvolvimento nos equipamentos embarcados, como sistemas de tubulação para movimentação do gás entre o tanque e o motor, válvulas, trocadores de calor, etc. Cada vez mais as limitações técnicas vão restringindo menos os tomadores de decisão, aumentando o peso das restrições econômicas (VERNENGO & RIZZUTO, 2014; GE & WANG, 2017).

2.7.6 Tipos de embarcações de abastecimento

Com o amadurecimento paulatino dos sistemas de abastecimento nos últimos 10 anos, diversas embarcações foram concebidas, e algumas delas já estão em operação. Exemplos relevantes seguem abaixo, com considerações a respeito de sua aplicabilidade neste estudo:

- Convertido a partir de um *ferryboat* na Suécia, o Seagas foi, em Março de 2013, a primeira embarcação para abastecimento de GNL STS da história (Figura 19). A conversão foi viabilizada graças ao suporte do programa TEN-T (*Trans-European Transport Networks*), que financia e subsidia infraestrutura de transportes na Europa. Operado pela Nauticor, ele abastece diariamente o *ferryboat* de grande porte Viking Grace com 60-70 toneladas de GNL (MARITIME CYPRUS, 2015).

Figura 19 – Balsa de abastecimento Seagas



Fonte: Maritime Cyprus, 2015

- Para abastecimento dos já citados navios porta-contêiner da TOTE, o armador Clean Marine Energy encomendou a primeira balsa para abastecimento de GNL construída na América do Norte (LNG WORLD NEWS, 2015). Essa balsa, cujo nome será *Clean Jacksonville* (Figura 3Figura 20), possui capacidade de 2.200 m³ de GNL (PIELLISCH, 2017) e deverá ser entregue em 2018.

Figura 20 – Balsa de abastecimento *Clean Jacksonville*



Fonte: LNG World News, 2015

- O conjunto de empurrador e balsa articulados (*Articulated Tug and Barge, ATB*) da companhia Q-LNG dos EUA (Figura 21), a ser afretado à Royal Dutch Shell. A balsa, atualmente em construção, terá a capacidade de transportar e abastecer 4.000 m³ de GNL (GCAPTAIN, 2017-a), o que equivale a 2,4 milhões de m³ de gás natural ou aproximadamente 17% da produção diária de Urucu. Seu projeto original é para servir ao abastecimento de grandes navios de cruzeiro na Flórida. Para o arco norte, a capacidade de cada embarcação precisará ser menor, mas o conceito do ATB é bastante interessante, pois o desacoplamento entre balsa e empurrador permite maior flexibilidade operacional;

Figura 21 – ATB da *Q-LNG Transport*



Fonte: gCaptain, 2017-a.

Há também um conjunto relevante de navios para abastecimento de gás natural na faixa de 5.000 m³ a 8.000 m³, para atendimento em regiões portuárias com projeção de grande demanda por gás como combustível de embarcações (THOMAS, 2017). São eles: *Engie Zeebrugge* (5.100 m³, do armador Gas4Sea), *Coralius* (5.800 m³, do armador Anthony Veder, afretado à Skangas), *Cardissa* (6.500 m³, do armador Shell). Há também dois navios de 7.500

m³ atualmente em construção, um para emprego na Europa (do armador Babcock Schulte Energy, afreta à Nauticor) e outro para emprego na Coréia do Sul (armador Korea Gas). Outra embarcação bastante relevante e inovadora é a balsa *Hummel*, a primeira GNL híbrida do mundo, operada pelo armador Becker Marine Systems. Essa balsa gera energia para a alimentação elétrica de navios de cruzeiro no porto de Hamburgo, na Alemanha, reduzindo assim o consumo e a poluição dessas embarcações quando atracadas (BECKER MARINE SYSTEMS, 2017).

Além das embarcações existentes ou em construção já citadas, há também projetos conceituais dignos de nota. Para atingir o que considera ser um mercado em crescimento (DAMEN, 2017), o conglomerado holandês de projetos e construção naval Damen Shipyards Group concebeu uma linha bastante completa de embarcações para abastecimento de GNL, com capacidades de 500, 1.500, 3.000, 5.000, 6.500 e 7.500 m³. A Figura 22 ilustra o navio de 6.500 m³. Outros escritórios de projeto também desenvolveram novas propostas de embarcações de abastecimento nos últimos anos, com destaque para a Sener (Espanha) e Jensen Maritime (EUA).

Figura 22 – Navio de abastecimento de GNL Damen 6.500 m³



Fonte: Damen, 2017

Uma última referência conceitual bastante relevante para possíveis aplicações na Amazônia é a balsa multimodal de baixo calado, citada por Regan, 2017. Essa balsa não seria propulsada, portanto resultaria mais barata, mas ficaria dependente de empurradores para sua movimentação. Ela seria capaz de abastecer navios com três tanques de 2.270 m³ cada um e, graças aos guindastes articulados instalados sobre o convés, poderia também fazer o transbordo de GNL por contêineres *ISO tank*, garantindo maior modularidade ao sistema.

Figura 23 – Balsa de calado raso para abastecimento de GNL



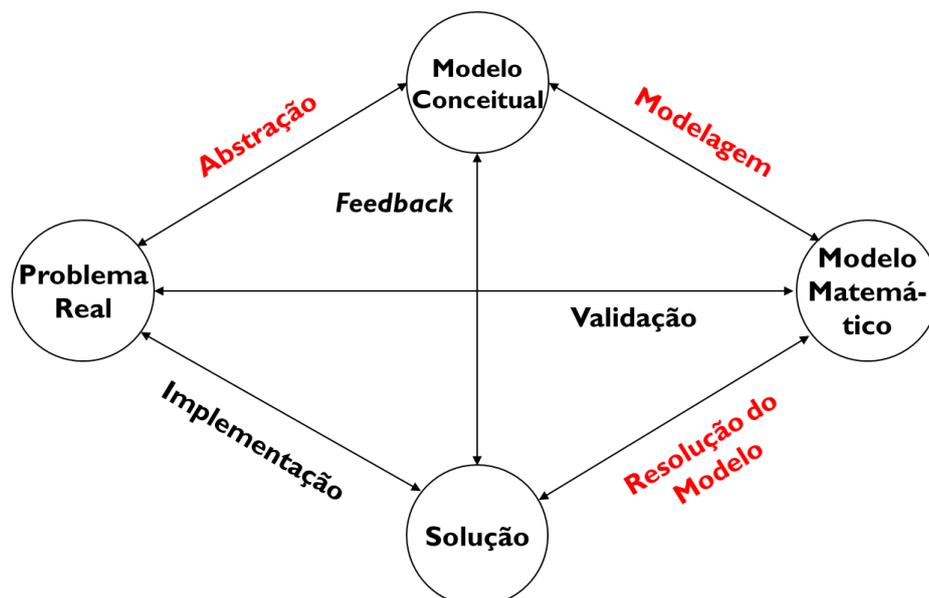
Fonte: Regan, 2017

2.8. Modelos Matemáticos de redes de distribuição

Deve-se atentar para a importância de se pesquisar ferramentas adequadas para o dimensionamento e otimização de sistemas de transporte complexos (FURTADO & KAWAMOTO, 1997; SETTI & WIDMER, 1997), buscando maximizar o retorno obtido com os recursos escassos empregados.

Para a resolução de redes de distribuição, como é o caso do problema em estudo, pode-se lançar mão de ferramentas de Pesquisa Operacional (TAHA, 2010; ARENALES et al., 2015). A sistemática para resolução de problemas desse tipo foi formalizada por Bertrand & Fransoo (2002), e está resumida na Figura 24.

Figura 24 – Sistemática de resolução de problemas de Pesquisa Operacional



Fonte: Bertrand & Fransoo, 2002

O primeiro passo é a escolha de um Problema Real. Em seguida, ele deverá ser abstraído, com as devidas simplificações, premissas e hipóteses, na forma de um Modelo Conceitual. Em seguida, esse modelo será transformado num Modelo Matemático, usualmente na forma de um conjunto de variáveis de decisão, restrições e função objetivo. A função objetivo será então minimizada ou maximizada. Usando algum método ou algoritmo adequado, a solução será obtida e, dependendo da complexidade do problema, essa solução poderá resolver parcialmente ou até mesmo totalmente o problema real original. É preciso, também, verificar a aderência do modelo matemático com a realidade, no processo de validação. Além disso, a solução obtida retroalimenta o modelo conceitual, podendo resultar em alterações ou adaptações.

A análises de redes de distribuição de GNL tem assumido diferentes formas na literatura. Andersson et al. (2015) escolheram uma rede com um ator da cadeia de suprimento responsável pela liquefação em diferentes plantas, gestão dos estoques do GNL em cada uma delas, roteirização das embarcações de distribuição numa frota heterogênea e entregas aos consumidores finais. A rede pode ser modelada como um Problema de Estoque e Roteirização (*Inventory Routing Problem*, IRP), porém ela encerra uma considerável complexidade, aumentando o tempo computacional sobremaneira. Para um problema IRP semelhante, pode-se aplicar também heurísticas (STÅLHANE et al., 2012). Uma abordagem diferente foi aplicada por Halvorsen-Weare & Fagerholt (2013). Nesse caso foi aplicado o modelo adequado ao Problema de Roteirização de Veículos (PRV), com as decisões de roteamento consistindo em quais embarcações devem servir quais cargas em qual sequência.

Neste trabalho, o Modelo Conceitual será descrito na seção 4.2 e o Modelo Matemático, na seção 4.3. O problema, definido na seção 4.1, consiste no dimensionamento da rede logística formada por uma certa quantidade de balsas de abastecimento de GNL. Portanto, buscar-se-á identificar a capacidade adequada da frota, a quantidade de embarcações empregadas na rede, a velocidade operacional e a rota que cada balsa realizará, com o objetivo de minimizar os custos. Esse tipo de problema enquadra-se como variante do PRV (LAPORTE & OSMAN, 1995; BRÄYSY & GENDREAU, 2005-a; BRÄYSY & GENDREAU, 2005-b; CORDEAU et al., 2006).

Braekers et al. (2016) elaboraram uma revisão bastante detalhada da classificação dos tipos de PRV's e revisaram o estado da arte dos diferentes tratamentos do problema em 277 artigos recentes. Uma das conclusões mais relevantes foi a de que os pesquisadores, ao analisar PRV's, buscam variantes que incluam características e premissas da "vida real".

O problema poderá ser enquadrado como um PRV multi-viagem (*multi-trip*) e sua solução envolverá a solução de um modelo de programação linear inteira mista.

3 Metodologia

3.1. Classificação da Pesquisa

A classificação nesta seção será feita com base na sistemática de Gil, 2002.

Quanto aos objetivos, trata-se de *pesquisa exploratória*, pois busca-se uma maior familiarização com o problema, utilizando levantamentos bibliográficos, aplicação de informações de natureza prática e elaboração de um estudo de caso.

Quanto aos procedimentos técnicos, trata-se de *pesquisa bibliográfica*, pois há muita informação já publicada a respeito do tema que pode ser aplicada no caso estudado; *pesquisa por levantamento*, devido à necessidade de estabelecimento de um banco de dados com as características das rotas, dos terminais e das frotas; e *pesquisa por estudo de caso*, pois os métodos serão aplicados num sistema razoavelmente limitado, porém com limites não tão claramente definidos. Praticamente não houve *pesquisa documental*, com seu emprego sendo feito apenas na extração dos dados da ANP de produção de gás natural em Urucu (ANP, 2017), e o método de *pesquisa experimental* não foi aplicado.

Quanto à natureza, trata-se de uma *pesquisa aplicada*, uma vez que trata de um problema prático existente num determinado setor econômico. As soluções propostas para o problema partem conhecimentos já anteriormente desenvolvidos em pesquisa básica, que serão articulados e modificados dentro dos limites de sua aplicação prática em interesses locais.

Quanto à forma de abordagem do problema, trata-se de *pesquisa de abordagem mista*. A rede logística necessita de dados de entrada que são selecionados e tratados de acordo com critérios e argumentos qualitativos. Em seguida o modelo matemático, portanto quantitativo, será elaborado e analisado também sob critérios quantitativos (custos totais).

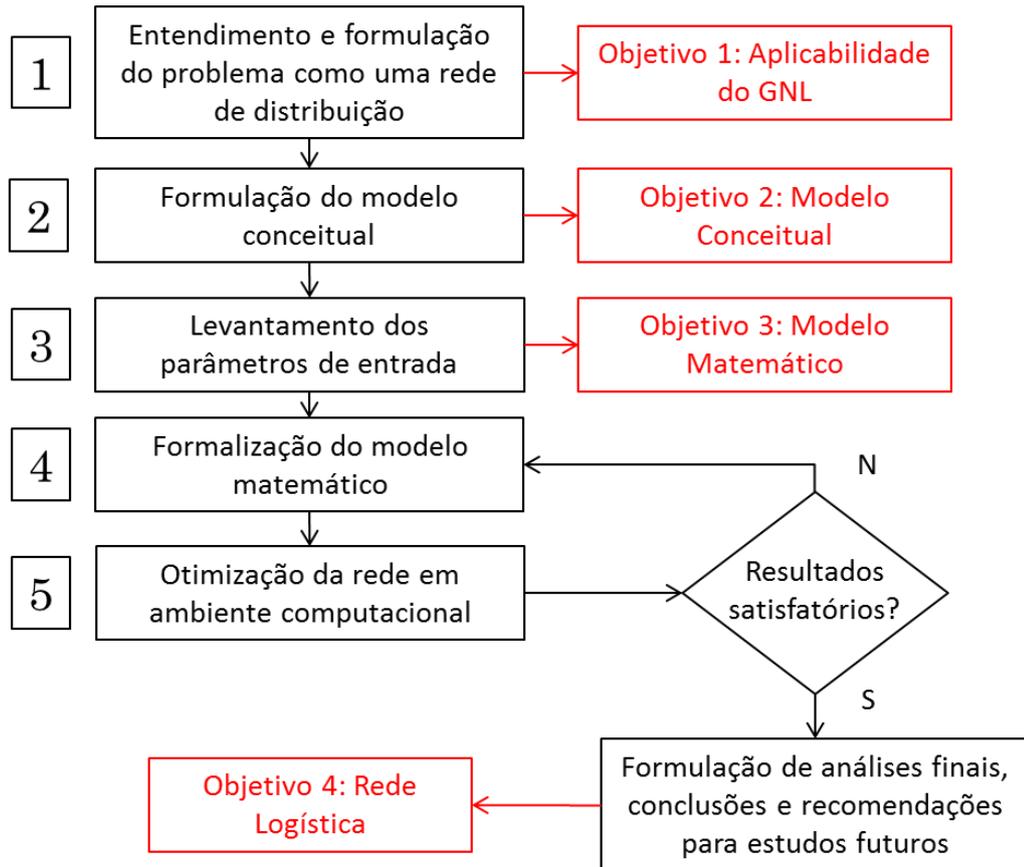
3.2. Identificação dos dados

Os dados a serem levantados, além daqueles já articulados na revisão bibliográfica, são os parâmetros de entrada do modelo matemático e serão discutidos em maior detalhe no Capítulo 4.

3.3. Estrutura da Metodologia

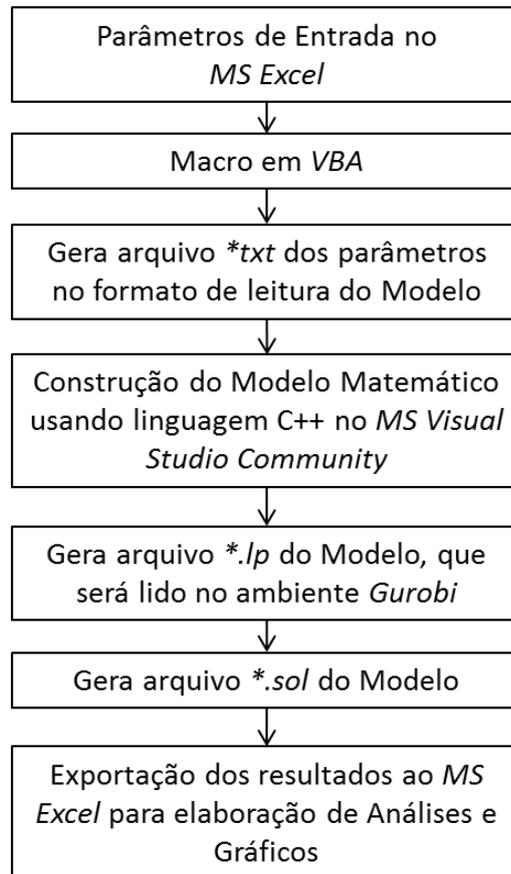
A estrutura da metodologia seguirá a sistemática ilustrada no fluxograma da Figura 25. O atendimento aos objetivos delineados no Capítulo 1 está destacado em vermelho.

Figura 25 – Estrutura da Metodologia



Fonte: Autor

A otimização da rede em ambiente computacional pode ser melhor detalhada com o auxílio da Figura 26 abaixo. O processo de tratamento dos dados começa e termina no *MS Excel*, usando como ferramentas para a execução das iterações do modelo o *MS Visual Studio Community* e o *Gurobi*.

Figura 26 – Procedimento computacional

Fonte: Autor

4 Modelo

4.1. Definição do problema

Embora o gás natural como combustível de embarcações na Amazônia tenha potencial para diversas aplicações, neste trabalho focaremos apenas no crescente mercado de transporte de grãos pelos rios Madeira, Tapajós e Amazonas. A área de interesse está ilustrada na Figura 27, a seguir.

Figura 27 – Área de interesse do estudo



Fonte: adaptado de Folha de S. Paulo, 2016

No interior do polígono destacado encontram-se: quase todo o curso do rio Madeira, o baixo curso do rio Tapajós e os cursos médio e baixo do rio Amazonas. O rio Amazonas é navegável em toda sua extensão, desde sua formação em Manaus (AM) a partir dos rios Negro e Solimões até sua foz. A foz do Amazonas é bastante complexa, dividindo-se em duas desembocaduras que são conhecidas como “Barra Norte” e “Barra Sul”, separadas pela Ilha de Marajó. Na Barra Norte encontra-se a capital do Amapá, Macapá. Adjacente a ela,

encontra-se Santana, uma das cidades-chave deste estudo. Nas imediações da Barra Sul encontra-se Belém e, aproximadamente 15km a oeste em linha reta, Barcarena.

Os rios Madeira e Tapajós, por serem afluentes da margem direita do Amazonas, fornecem uma via natural de comunicação com o centro-oeste do Brasil. Para sua inserção no escoamento dos principais produtos de exportação agrícola do Brasil (soja e milho), seria preciso aproximá-los das áreas de produção agrícola. Isso poderia ser feito de três maneiras, começando pela mais adequada:

1. Aumento da extensão navegável dos rios. Para o rio Madeira, isso significaria a construção simultânea de eclusas com as Usinas Hidrelétricas (UHE's) de Santo Antônio e Jirau (RO), já concluídas sem eclusas, e uma longa lista de intervenções nos rios Mamoré e Guaporé, até Vila Bela da Santíssima Trindade (MT). Essas intervenções incluiriam barragens, eclusagens, retificações, dragagens e a passagem por áreas de sensível preservação ambiental. Embora a viabilização da navegação no rio Guaporé até o oeste do Mato Grosso proporcionaria grandes ganhos para a logística de cargas brasileira, é improvável que essas obras sejam realizadas nas próximas décadas. Por isso, faria pouco sentido econômico construir eclusas nas usinas do Madeira, e assim foi feito. Em relação ao rio Tapajós, a quantidade de intervenções é bem menor. O rio é naturalmente navegável até Itaituba (PA), pois logo a montante da cidade encontra-se a cachoeira de São Luiz do Tapajós. É o aproveitamento da navegação no trecho entre Itaituba e Santarém que tem atraído grandes investimentos nos últimos anos, com o asfaltamento da BR-163. As Estações de Transbordo de Carga (ETC's) de diversos grupos investidores foram construídas na margem direita do rio, num distrito de Itaituba chamado Miritituba. À montante da cachoeira de São Luiz há outros obstáculos no próprio rio Tapajós, mas o potencial de navegação é muito grande, pois o rio Teles Pires, formador oriental do Tapajós, possui volume adequado à navegação até Sinop e Sorriso, no centro da produção agrícola de Mato Grosso. O rio Juruena, formador ocidental do Tapajós, também apresenta grande potencial até Juína (MT). Porém, diversos desníveis precisariam ser vencidos por meio de UHE's e eclusas, formando o que convencionou-se chamar de Hidrovia Tapajós-Teles Pires-Juruena. Maiores detalhes fogem do escopo deste trabalho; assumiremos, entretanto, que tanto as hidrovias do Mamoré-Guaporé como as do Tapajós e afluentes não serão viabilizadas no horizonte de tempo estudado.

2. A alternativa seguinte para o acesso aos trechos naturalmente navegáveis dos rios seria a construção de ferrovias. Porém, apesar de estarem no planejamento de transporte do governo e da iniciativa privada há décadas, nenhuma ferrovia no trecho estudado ainda foi viabilizada. Hoje, os projetos em discussão são a ferrovia Transoceânica (ou Bioceânica) e a Ferrogrão. A Transoceânica ligaria o Rio de Janeiro aos portos peruanos do Pacífico, passando por Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso, Rondônia e Acre. Ao custo estimado de R\$40 bilhões, ela possui o interesse de investidores e do governo chinês, mas ainda está longe de ser concretizada. Teria, porém, grande utilidade ao conectar relevantes áreas produtoras de grãos (Mato Grosso, sul de Rondônia e potencialmente o sul do Acre) aos terminais de Porto Velho. Já a Ferrogrão está em fase de estudos mais maduros. Seu traçado ligaria Sinop a Miritituba (934km) e, segundo o Governo Federal (PPI, 2017), seria licitada em 2018 no âmbito do Programa de Parcerias de Investimentos (PPI). Se concretizada, a Ferrogrão tem o potencial de baixar ainda mais o frete das *commodities* agrícolas escoadas pelo Arco Norte.
3. Finalmente, a última alternativa para a interligação dos rios Madeira e Tapajós com as áreas produtoras seria a construção de rodovias. A conexão de Porto Velho com o resto do país por meio de rodovia asfaltada ocorreu em 1983, com a inauguração da BR-364 (G1 RONDÔNIA, 2016). Mais recentemente, com os trabalhos realizados lenta, mas ininterruptamente nos últimos anos, a BR-163, de Cuiabá a Santarém, está prestes a ter seu asfaltamento completado, faltando hoje apenas aproximadamente 85km (5% do total de 1780km). Porém, os atrasos na finalização da obra já causaram sérios prejuízos na safra de 2017, ano em que diversas ETC's já estavam operantes e com seus clientes contando com a disponibilidade da rodovia.

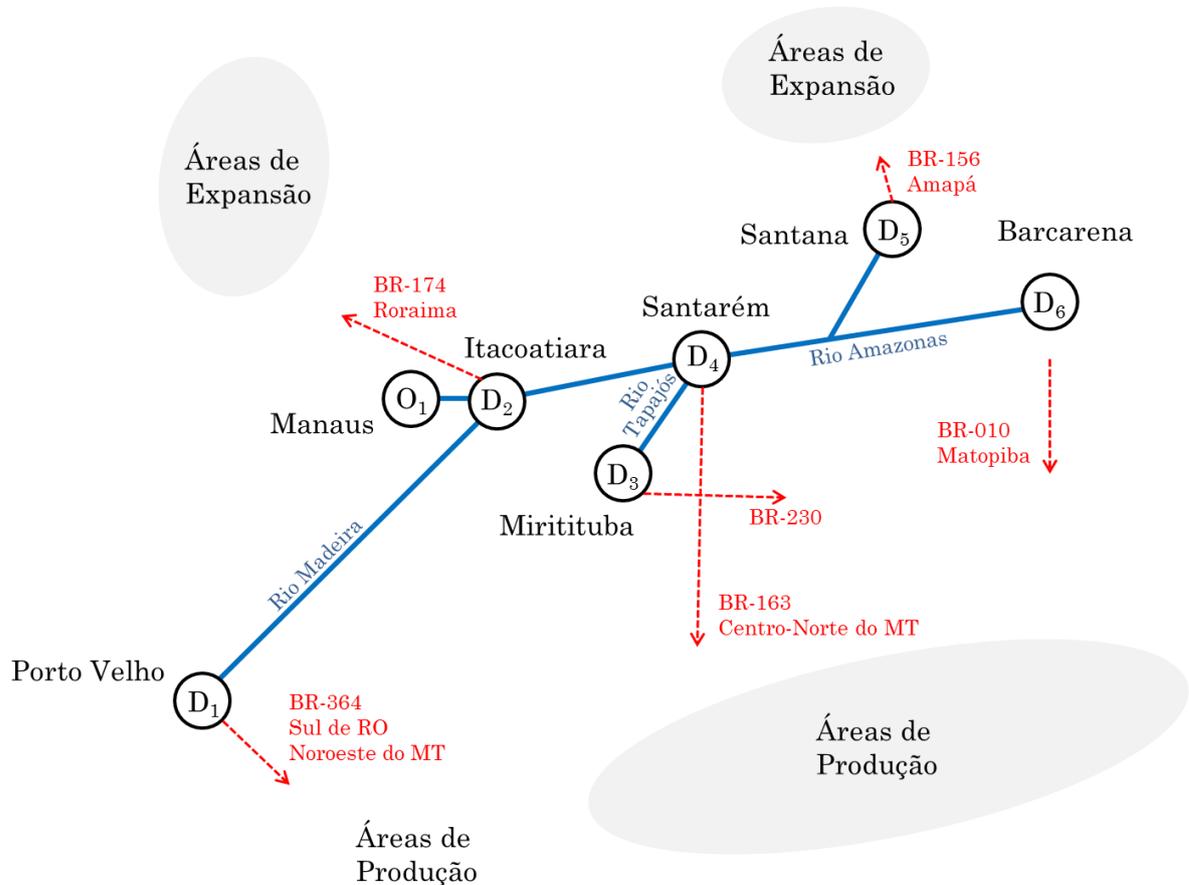
Apesar de o acesso por rodovia asfaltada estar disponível desde 1983, foram necessários alguns anos até a expansão da fronteira agrícola e o aparecimento de investidores dispostos a construir a infraestrutura de navegação necessária para a navegação graneleira no rio Madeira: portos e embarcações. A Hermasa, companhia de navegação do grupo Amaggi, iniciou então, de forma pioneira, a navegação em 1997, com terminais em Porto Velho (RO) e Itacoatiara (AM). A partir do início dos anos 2000, seguiu-se a Transportes Bertolini, também operando no rio Madeira. Nos últimos 15 anos diversas iniciativas vieram em sequência: o porto da Cargill, em Santarém (inaugurado em 2003) e, nos últimos 5 anos, os investimentos no corredor Miritituba – Barcarena por novos entrantes: Unitapajós (*joint-venture* entre Bunge

e Hermasa), Hidrovias do Brasil S.A. (HBSA), Cianport, Louis Dreyfus Commodities (LDC), Navegrãos e Caramuru. As origens, perfis corporativos e estratégias de investimento são diversos, mas todos eles buscam fornecer a seus clientes um custo de frete aproximadamente 30% mais barato em relação aos portos competidores do sul e sudeste: Santos (SP) e Paranaguá.

Tanto os novos como os tradicionais armadores operando no Arco Norte conceberam e encomendaram frotas propelidas a diesel marítimo (MDO) ou óleo pesado (HFO). Quase toda a frota já está construída ou com previsão de conclusão em 2018. A frota hoje passa de 700 barcaças graneleiras, com capacidades de carga (TPB, toneladas de porte bruto ou DWT, *deadweight*) entre 1.800 e 3.400 toneladas. Os empurradores passam de 100, com potências entre 600 HP e 7.200 HP. Porém, como vimos anteriormente, o emprego do gás natural como combustível nessa frota pode fornecer ganhos relevantes, tanto ambientais como econômicos. Parte da frota poderia ser convertida para operação *dual-fuel* (diesel-GNL) e parte da frota poderia ser substituída, ao longo dos anos, por novos empurradores projetados desde sua concepção para operação *dual-fuel*. Mas será preciso dimensionar uma rede de abastecimento do gás para essa frota. É para contribuir com potenciais soluções para este principal problema que o presente trabalho foi elaborado.

A rede hidroviária ilustrada na Figura 27 foi então representada esquematicamente na Figura 28. Foram incluídas, apenas para a facilitação do entendimento, a representação das áreas de produção atuais (sul de Rondônia, Mato Grosso, sul do Pará e MATOPIBA – sul do Maranhão e do Piauí, Tocantins, e oeste da Bahia) e das áreas atualmente em expansão: Amapá e Roraima. Os Terminais de Uso Privado tanto de Santana (AP) como de Itacoatiara (AM) já estão recebendo grãos diretamente por via rodoviária de suas zonas próximas de influência. O mesmo ocorre com os TUP's de Santarém e Barcarena: eles recebem não apenas as cargas de transbordo hidroviário, mas também diretamente por via rodoviária.

Figura 28 – Modelo da rede de distribuição, incluindo acessos rodoviários



Fonte: Autor

4.2. Descrição e aplicação do Modelo Conceitual

A modelo conceitual consiste na rede da Figura 28. São 6 pontos de demanda do GNL, variando de D₁ (Porto Velho) até D₆. (Barcarena). O ponto O₁ é o ponto de oferta de GNL, em Manaus. Os comboios graneleiros navegam nos rios indicados, mas a sua demanda por GNL será modelada por uma média diária, dada em m³ de GNL (ver item 4.2.6). Essa demanda será atendida por uma frota de balsas de abastecimento de GNL autopropelidas. Cada porto de demanda deverá ser coberto por no mínimo uma balsa. Quando que está servindo como estoque de GNL em um dado porto esvaziar-se, deve haver outra imediatamente disponível para atender à demanda. O objetivo é chegar até uma rede composta por uma frota de balsas de capacidade, velocidade e quantidade adequada, com cada uma delas realizando o roteiro que minimiza os custos totais.

4.2.1 Premissas

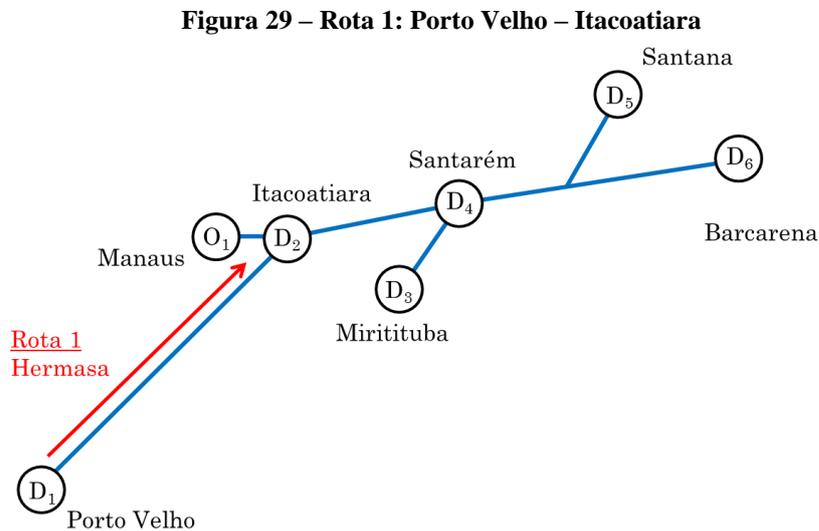
Para a construção do Modelo Conceitual, as seguintes premissas adotadas seguem listadas abaixo. A maior delas já foi discutida na revisão bibliográfica, porém a lista completa está reproduzida para facilitar o entendimento.

1. Será dimensionada uma rede para abastecer as embarcações com gás natural, substituindo os combustíveis atualmente empregados na navegação da região de estudo (MGO e MFO). O gás natural resulta em benefícios ambientais, econômicos e de segurança aos armadores;
2. A forma de distribuição escolhida é por meio do gás liquefeito (GNL), e não o GNC, principalmente por questões de segurança (não ser necessário tanques de alta pressão a bordo) e por disponibilidade de espaço;
3. Não será considerada a navegação de todos os tipos de embarcações, mas apenas os comboios graneleiros (granéis sólidos), devido a ser o setor de maior tamanho e maior crescimento;
4. A oferta de gás natural será considerada como disponível apenas em Manaus, que é o cenário real atual. Em estudos futuros, poder-se-á considerar cenários com disponibilidade de gás natural em outros locais discutidos no item 2.6, com preferência para Barcarena como segundo ponto de oferta;
5. A demanda está modelada de acordo com os terminais portuários onde hoje há movimentação ou onde haverá num horizonte de curto prazo (como é o caso de Santana). Marabá foi excluída do modelo por ainda depender de vultosos investimentos públicos, que podem ainda demorar muitos anos para se concretizar;
6. A rede não contemplará terminais de liquefação e armazenamento necessários para disponibilizar o gás natural em forma de GNL em Manaus. O foco será dado nas embarcações de abastecimento;
7. Não será considerada a sazonalidade anual de movimentação de carga. Sabe-se que os comboios navegam de acordo com duas safras. Uma é a principal (normalmente soja) e a outra é secundária (normalmente milho, também chamada “safrinha”). A navegação (medida em TKU’s, por exemplo) muda mês a mês ao longo do ano, mas tal efeito não foi considerado no estudo pois entende-se que, para uma primeira modelagem, basta dimensionar a carga como se a demanda mensal uniforme fosse, distribuindo igualmente a demanda anual;

8. Foram consideradas balsas de abastecimento com capacidade homogênea e autopropelidas, para garantir que elas operem de maneira independente entre si. Para análises posteriores, pode-se considerar uma rede com balsas de diferentes capacidades e sem propulsão (por exemplo, em arranjos ATB's);
9. A forma de abastecimento considerada será apenas *ship to ship* (STS), pois não foi considerada a disponibilidade de terminais de armazenamento em terra nem a disponibilidade de GNL por outras origens rodoviárias;
10. O horizonte de planejamento para a execução do modelo é de 30 dias. As duas principais vantagens de se escolher esse horizonte relativamente limitado são duas. Por um lado, replica-se o cenário usual de planejamento operacional de uma companhia de navegação. Por outro, limita-se sobremaneira o tempo computacional do modelo. Variações na demanda de médio e longo prazo serão contempladas dentro da análise de sensibilidade.

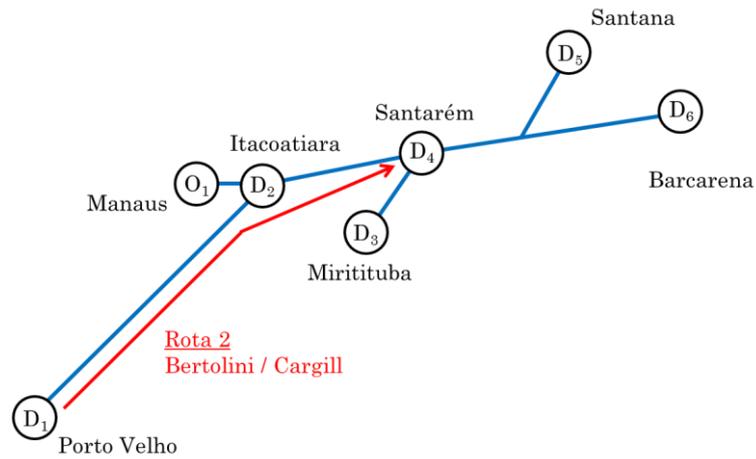
4.2.2 Rotas

As imagens a seguir ilustram as rotas empregadas por cada armador que opera na rede.



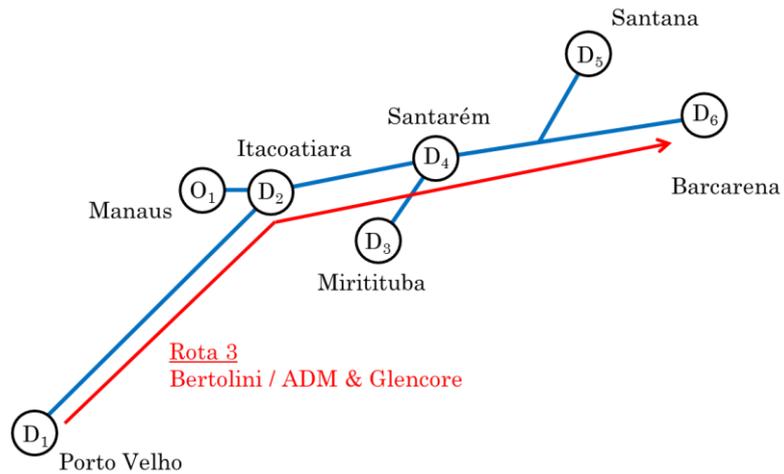
Fonte: Autor

Figura 30 – Rota 2: Porto Velho – Santarém



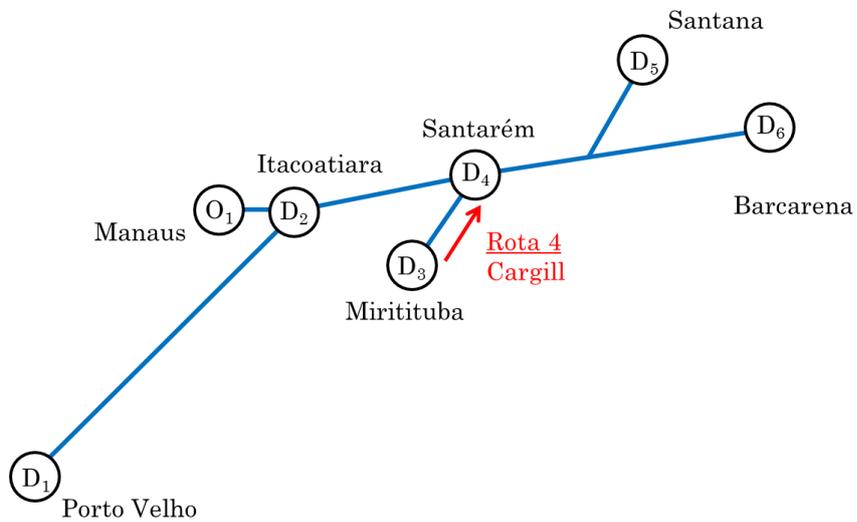
Fonte: Autor

Figura 31 – Rota 3: Porto Velho – Barcarena



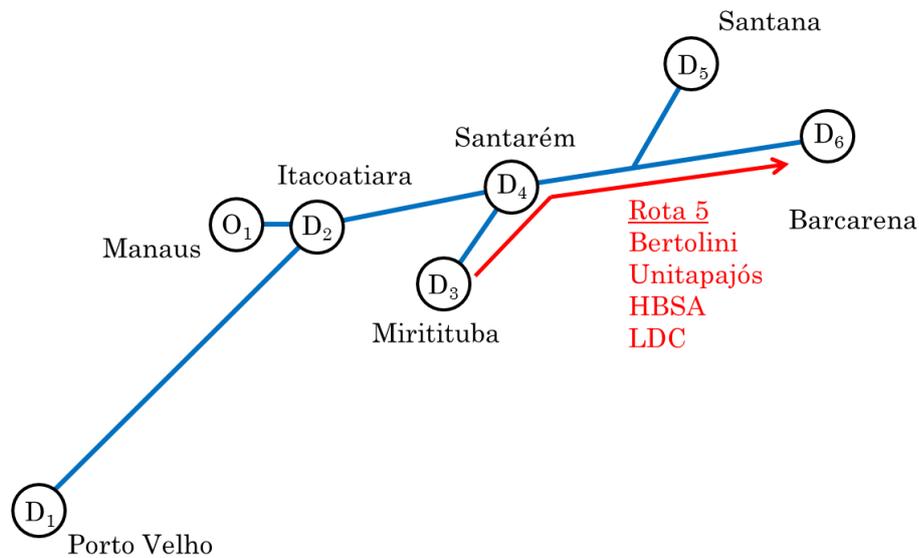
Fonte: Autor

Figura 32 – Rota 4: Miritituba – Santarém



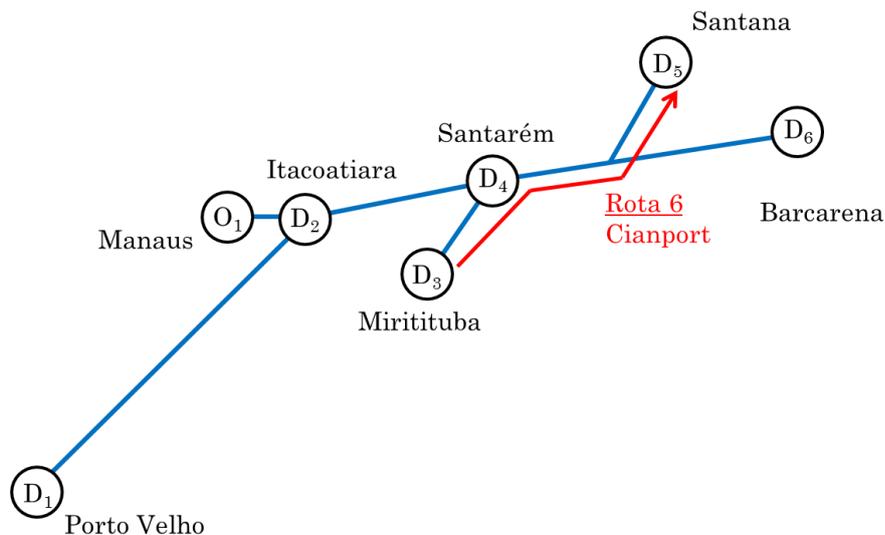
Fonte: Autor

Figura 33 – Rota 5: Miritituba – Barcarena



Fonte: Autor

Figura 34 – Rota 6: Miritituba – Santana



Fonte: Autor

Como se pode notar, nem todos os armadores operam hoje em mais de uma rota. Com efeito, apenas a Bertolini opera em 4 rotas e a Hermosa opera em duas, se contarmos sua subsidiária Unitapajós conjuntamente. Todos os outros armadores operam em apenas uma rota de grãos. A Navegrãos ainda não publicou sua definição sobre como operará, mas com o amadurecimento do mercado, ela pode preencher uma lacuna de operador no mercado *spot*, ou no afretamento de suas barcaças para terceiros. De qualquer forma, a escolha das rotas é uma decisão estratégica e dinâmica com a evolução do mercado. Portanto, as condições verificadas hoje podem mudar no futuro. Porém, neste trabalho assumiremos que a

mobilização de cada armador para cada rota não muda. As informações estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Armadores e rotas

#	Armador	Rota					
		PVH - ITA	PVH - STM	PVH - BAR	MTT - STM	MTT - BAR	MTT - SAN
1	Hermasa	X	-	-	-	-	-
2	Bertolini	-	X	X	X	X	-
3	Cargill	-	-	-	X	-	-
4	Unitapajós	-	-	-	-	X	-
5	HBSA	-	-	-	-	X	-
6	Cianport	-	-	-	-	-	X
7	LDC	-	-	-	-	X	-
8	Navegrãos	-	-	-	-	-	-
9	Caramuru	-	-	-	-	-	X

Fonte: Autor

Quanto às cargas, embora alguns armadores naveguem também no transporte de fertilizantes como “carga de retorno”, nosso foco será apenas nas cargas de soja e milho. A Caramuru, nesse aspecto, possui uma peculiaridade: é a única a operar com proteína concentrada de soja (SPC, *soy protein concentrate*).

A distância entre todos os portos está resumida na Tabela 2. Os valores foram obtidos a partir de medições de distância no *Google Maps*.

Tabela 2 – Matriz de distâncias (km)

		O1	D6	D1	D2	D3	D4	D5
		Manaus	Barcarena	Porto Velho	Itacoatiara	Miritituba	Santarém	Santana
O1	Manaus	-	1590	1200	190	1010	740	1290
D6	Barcarena		-	2500	1400	1120	850	450
D1	Porto Velho			-	1100	1920	1650	2200
D2	Itacoatiara				-	820	550	1100
D3	Miritituba					-	270	820
D4	Santarém						-	550
D5	Santana							-

Fonte: Autor

4.2.3 Terminais Graneleiros

Os terminais operacionais ou em fase adiantada de projeto e construção com inauguração para os próximos 5 anos estão listados na Tabela 3 (total consolidado) e na Tabela 4 (desagregado). Os valores indicam a quantidade de carga (soja ou milho, em milhões de toneladas por ano) projetada para aquela rota pelos operadores.

Tabela 3 – Terminais Graneleiros: origens e destinos, total

TOTAL ORIGENS (milhões de t)		TOTAL DESTINOS (milhões de t)	
Porto Velho	12,0	Itacoatiara	5,0
Miritituba	17,7	Santarém	5,0
SOMA	29,7	Barcarena	19,0
		Santana	2,6
		SOMA	31,6

Fonte: Autor

Tabela 4 – Terminais Graneleiros: origens e destinos, dados desagregados

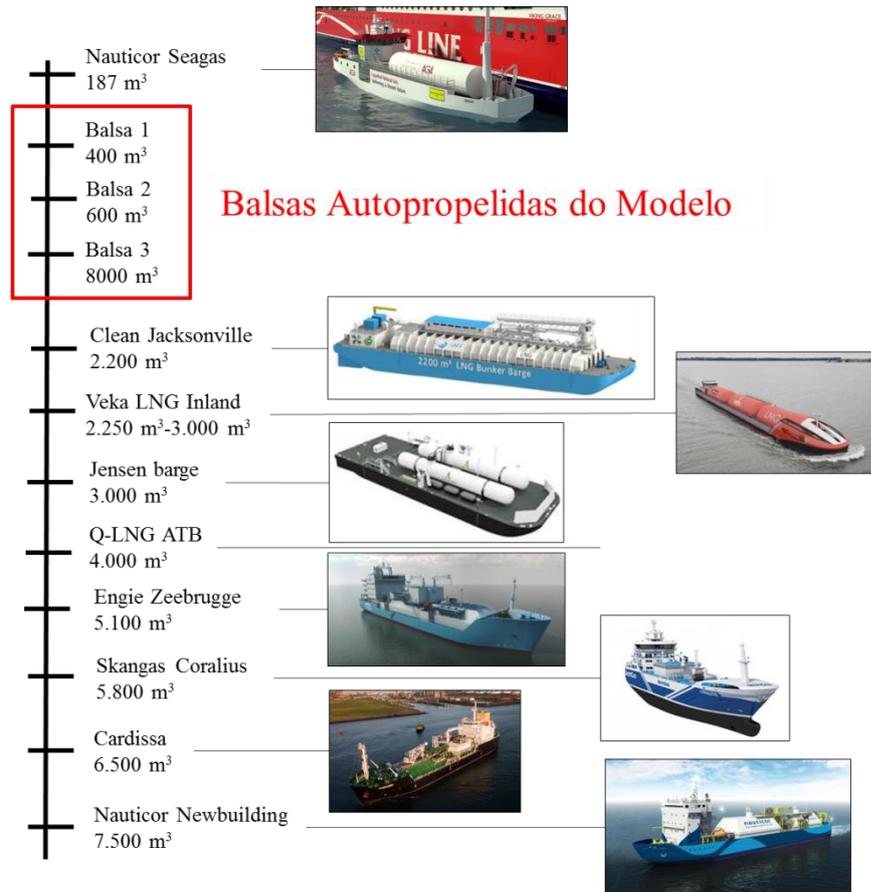
#	Terminal	Tipo	Localização	Capacidade no médio prazo (milhões de t)	Controlador
1	Amaggi Porto Velho	Porto Público	Urbana - PVH	2,0	Amaggi
2	Amaggi Porto Chuelo	TUP	Afastada - PVH	5,0	Amaggi
3	Cargill Porto Velho	ETC	Urbana - PVH	2,5	Cargill
4	Bertolini Cujubinzinho	ETC	Afastada - PVH	2,5	Bertolini
5	Amaggi Itacoatiara	TUP + ETC (flutuante)	Afastada - ITA	5,0	Amaggi
6	Bertolini Miritituba	ETC (flutuante)	Afastada - MTT	1,5	Bertolini
7	Cianport Miritituba	ETC	Afastada - MTT	3,0	Cianport
8	Bunge Miritituba	ETC	Afastada - MTT	4,0	Bunge e Amaggi
9	HBSA Miritituba	ETC	Afastada - MTT	4,0	HBSA
10	Cargill Miritituba	ETC	Afastada - MTT	3,0	Cargill
11	Caramuru Itaituba	ETC (Itaituba)	Afastada - MTT	0,2	Caramuru
12	LDC Santarenzinho	ETC (Rurópolis)	Afastada - MTT	2,0	LDC
13	Cargill Santarém	TUP	Urbana - STM	5,0	Cargill
14	Ponta da Montanha (TGPM)	TUP	Afastada - BAR	6,0	ADM-Glencore
15	HBSA Barcarena	TUP	Afastada - BAR	6,0	HBSA
16	Bunge Barcarena (TERFRON)	TUP	Afastada - BAR	5,0	Bunge e Amaggi
17	LDC Enseada do Malato	TUP	Afastada - BAR	2,0	LDC
18	Cianport Santana	TUP	Urbana - SAN	1,8	Cianport
19	Caramuru Santana	TUP	Urbana - SAN	0,8	Cianport

Fonte: Autor

4.2.4 Embarcações de Abastecimento de GNL

As embarcações serão balsas autopropelidas, formando uma frota homogênea (todas as balsas com a mesma capacidade). A capacidade será alterada nas análises de sensibilidade, em três faixas: 400, 600 e 800 m³. Como pode-se notar na consolidação dos tipos de balsas e navios de abastecimento de GNL hoje existentes no mundo (Figura 35), essas faixas de capacidade encaixam-se num tamanho hoje ainda não disponível, porém deve-se lembrar que praticamente todos os sistemas GNL STS hoje existentes são para abastecimento de navios de longo curso, portanto a capacidade da embarcação de abastecimento deve mesmo ser maior, nesses casos.

Figura 35 – Embarcações abastecedoras de GNL



Fonte: Autor, com dados e imagens compilados de várias fontes (ver item 2.7.6)

4.2.5 Parâmetros Gerais

Alguns parâmetros físico-químicos dos combustíveis em estudo serão utilizados em diversos cálculos em seguida. Esses parâmetros relevantes seguem consolidados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros dos combustíveis

#	Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte / Comentários
1	Peso específico HFO	988	kg/m ³	Petrobras, 2013. (HFO 380)
2	Peso específico MGO	877	kg/m ³	Petrobras, 2013. (MGO DMA)
3	Peso específico gás natural	0,74	kg/m ³	Mokhatab et al., 2013.
4	Peso específico GNL	465	kg/m ³	Mokhatab et al., 2013.
5	Poder calorífico MGO	39.465.000	kJ/m ³	DNV GL, 2016
6	Poder calorífico HFO	42.187.600	kJ/m ³	ISO 8217, 2010. (RMG 380)
7	Poder calorífico gás natural típico em kJ/m ³	37.000	kJ/m ³	WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2016.
8	Poder calorífico gás natural de Urucu em kJ/m ³	35.000	kJ/m ³	Resolução ANP N° 16, 2008.
9	Poder calorífico gás natural de Urucu em Btu/m ³	33.174	Btu/m ³	1 kJ = 0,9478 Btu
10	Taxa de conversão HFO-gás natural	0,0008296	-	1m ³ de gás natural = X m ³ de HFO
11	Taxa de conversão MGO-gás natural	0,0008869	-	1m ³ de gás natural = X m ³ de MGO
12	Taxa de conversão gás natural-GNL	600	-	Mokhatab et al., 2013.

Fonte: Autor

O peso específico e o poder calorífico de gás natural varia com sua composição, e esse fato é ainda mais relevante ao considerarmos que o gás de Urucu é bastante pobre em metano e rico em nitrogênio. Conseqüentemente, seu poder calorífico é menor que os valores de referência. Por isso, qualquer consideração de eficiência energética ou de comparação de custos deve ser ponderada pelo poder calorífico da mistura de gás sendo estudada.

São também relevantes os parâmetros operacionais, ambientais e de máquinas, consolidados na Tabela 6, e os parâmetros econômico-financeiros, na Tabela 7. As velocidades dos comboios foram padronizadas para 10km/h, embora a escolha da velocidade possa mudar frequentemente de acordo com as forças de mercado. Maiores valores de frete levam os armadores a navegar mais rápido. A velocidade das balsas GNL foi definida como 50% maior.

No modelo, a velocidade de correnteza dos rios foi considerada fixa como 1nó, porém a correnteza na realidade pode variar ao longo do ano, conforme se sucedem as temporadas de enchente e vazante. Além disso, a correnteza pode variar para diferentes trechos de um mesmo rio e mesmo entre diferentes rios. Por hora, o modelo não contempla essas sutilezas. Apenas haverá uma velocidade de subida do rio (4,4 nós para os comboios graneleiros e 7 nós para as balsas GNL) e outra de descida (6,4 nós para os comboios e 9 nós para as balsas).

Os valores de consumo específico (por unidade de energia ou por unidade de tempo) foram obtidos com dados médios tabelados e frequentemente usados na literatura.

Tabela 6 – Parâmetros Operacionais, Ambientais e de Máquinas

#	Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte / Comentários
1	Velocidade Média dos comboios graneleiros	5,4	nós	10km/h - padrão do mercado.
2	Velocidade Média dos das balsas GNL	8	nós	15km/h - padrão do mercado.
3	Consumo de MGO	190	g/kWh	ENTEC UK, 2002.
4	Consumo de HFO	200	g/kWh	ENTEC UK, 2002.
5	Consumo de GNL na balsa	150	Nm ³ /h	Diesel Service and Supply, 2017. / Estimado p/ potência instalada de 600 HP e margem de 90%.
6	Correnteza média nos rios	1	nós	Considerada fixa.

Fonte: Autor

Tabela 7 – Parâmetros Econômico-Financeiros

#	Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte / Comentários
1	Taxa de câmbio	3,33	R\$/US\$	Banco Central do Brasil, 2017. PTAX de 14/12/2017
2	Preço do HFO	1,65	R\$/l	Cotação feita junto à Petrobras
3	Preço do MGO	3,00	R\$/l	Cotação feita junto à Petrobras
4	Preço do Gás no Amazonas em MMBtu	17,20	US\$/MMBtu	Conversão de dólar para real e de Btu para m ³
5	Preço do Gás no Amazonas em Nm ³	1,90	R\$/m ³	Tabela de Preços Cigás - Novembro de 2017
6	Preço do Gás no Japão em MMBtu	6,00	US\$/MMBtu	Hellenic Shipping, 2017.
7	Preço do Gás no Japão em Nm ³	0,66	R\$/m ³	Valor equivalente para o PCS do gás de Urucu
8	Preço do Gás nos EUA em MMBtu	3,00	US\$/MMBtu	U.S. IEA, 2017 - <i>Henry Hub Spot Price</i>
9	Preço do Gás nos EUA em Nm ³	0,33	R\$/m ³	Valor equivalente para o PCS do gás de Urucu
10	Custo de liquefação	R\$ 1,10	R\$/m ³	Semple, 2013 - US\$10/mmBtu
11	Custo por kg de peso leve da balsa autopropelida convencional	R\$ 35,00	R\$/kg	Dados de mercado
12	Sobrecusto de embarcação GNL sobre embarcação convencional	40%	%	Dados de mercado
13	Custo por kg de peso leve da balsa autopropelida GNL	R\$ 49,00	R\$/kg	Calculado

Fonte: Autor

4.2.6 Demanda por GNL

Para o cálculo estimado da demanda por GNL a ser considerada no estudo, antes deve-se estimar o consumo de MGO e HFO dos comboios graneleiros do Arco Norte. O procedimento adotado será descrito a seguir.

1. Definição dos comboios típicos para cada uma das 6 Rotas. Além dos parâmetros da Tabela 8, a Figura 36 ilustra um dos comboios típicos considerados. O empurrador (E/M) a ser abastecido com GNL é a embarcação que aparece no canto inferior direito da imagem.

Tabela 8 – Dados dos comboios típicos por rota

Rotas		Características								
#	Nome	Armador	Número de barcaças	Arranjo	Dados da barcaça típica (box e raked)				TPB do comboio (t)	Combustível
					Compr. (m)	Boca (m)	Calado (m)	TPB (t)		
1	PVH - ITA	Hermasa	20	5x4	61,0	10,67	3,66	1950	39000	HFO
2	PVH - STM	Bertolini	9	3x3	62,0	12,00	4,00	2500	22500	MGO
3	PVH - BAR	Bertolini	9	3x3	62,0	12,00	4,00	2500	22500	MGO
4	MTT - STM	Cargill	9	3x3	61,0	15,00	3,86	3250	29250	MGO
5	MTT - BAR	HBSA	25	5x5	61,0	10,67	3,66	1950	48750	HFO
6	MTT - SAN	Cianport	16	4x4	76,0	12,00	3,65	2850	45600	MGO

Fonte: Autor

Figura 36 – Comboio típico para a Rota 1

Fonte: Amaggi Navegação, 2017

- Para cada comboio, foi aplicado o clássico Método de Howe (HOWE, 1967) para cálculo da resistência hidrodinâmica na velocidade de serviço (10km/h). Além dos parâmetros da Tabela 8, a Tabela 9 ilustra os dados de entrada comuns a todos os comboios que foram inseridos nos cálculos. A Figura 37 é o resultado do modelo de Howe, com a potência do empurrador (BHP) associada a cada comboio, para velocidades crescentes.

Tabela 9 – Método de Howe: dados comuns a todos os comboios

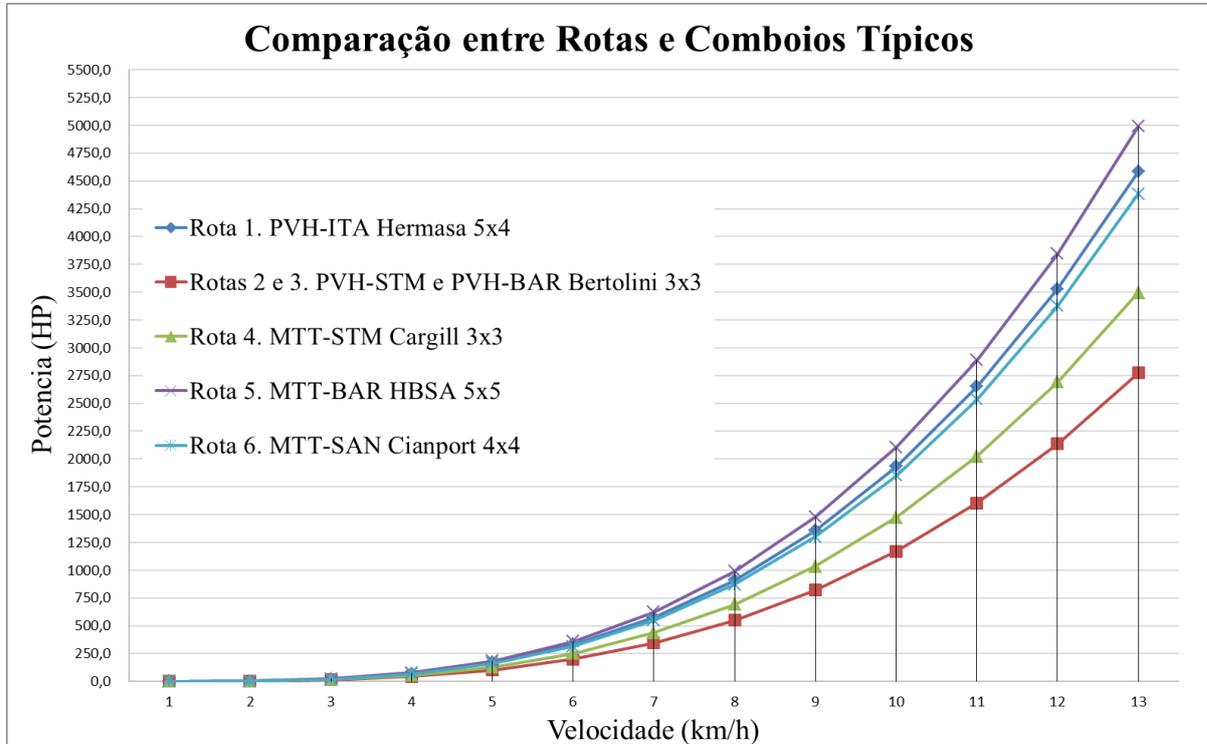
#	Método de Howe		
	Dados comuns a todos os comboios		
	Nome e símbolo	Valor	Unidade
1	Velocidade de operação	10,00	km/h
2	Coefficiente de bloco	0,90	-
3	Fator de serviço	1,00	-
4	Profundidade da via	7,00	m
5	Largura da via	2000,00	m
6	Montagem do comboio	Semi-integrado	-

Fonte: Autor

- Para as velocidades de operação dos comboios graneleiros e das balsas GNL e considerando a velocidade da correnteza, pode-se obter as matrizes de tempos para cada rota e para cada tipo de embarcação. Essas matrizes são úteis para o dimensionamento da demanda e também para o modelo matemático de otimização. A Tabela 10 é a matriz dos tempos de viagem dos comboios graneleiros em horas, enquanto a Tabela 11 converte os tempos para dias. Da

mesma forma, a Tabela 12 mostra o tempo de viagem das balsas GNL em horas, com a Tabela 13 mostrando os tempos em dias.

Figura 37 – Resultados do cálculo da resistência hidrodinâmica dos comboios



Fonte: Autor

Tabela 10 – Matriz de tempos de viagem em horas: comboios graneleiros

		O1	D6	D1	D2	D3	D4	D5
		Manaus	Barcarena	Porto Velho	Itacoatiara	Miritituba	Santarém	Santana
O1	Manaus	-	134,1	141,5	16,0	95,6	62,4	108,8
D6	Barcarena	195,1	-	306,8	171,8	137,4	104,3	45,0
D1	Porto Velho	107,0	210,9	-	92,8	172,3	139,2	185,6
D2	Itacoatiara	23,3	118,1	135,0	-	79,5	46,4	92,8
D3	Miritituba	113,6	94,5	225,3	90,3	-	22,8	69,2
D4	Santarém	90,8	71,7	202,5	67,5	33,1	-	46,4
D5	Santana	158,3	45,0	270,0	135,0	100,6	67,5	-

Fonte: Autor

Tabela 11 – Matriz de tempos de viagem em dias: comboios graneleiros

		O1	D6	D1	D2	D3	D4	D5
		Manaus	Barcarena	Porto Velho	Itacoatiara	Miritituba	Santarém	Santana
O1	Manaus	-	5,59	5,90	0,67	3,98	2,60	4,53
D6	Barcarena	8,13	-	12,78	7,16	5,73	4,35	1,87
D1	Porto Velho	4,46	8,79	-	3,87	7,18	5,80	7,73
D2	Itacoatiara	0,97	4,92	5,62	-	3,31	1,93	3,87
D3	Miritituba	4,73	3,94	9,39	3,76	-	0,95	2,88
D4	Santarém	3,78	2,99	8,44	2,81	1,38	-	1,93
D5	Santana	6,60	1,87	11,25	5,62	4,19	2,81	-

Fonte: Autor

Tabela 12 – Matriz de tempos de viagem em horas: balsas GNL

		O1	D6	D1	D2	D3	D4	D5
		Manaus	Barcarena	Porto Velho	Itacoatiara	Miritituba	Santarém	Santana
O1	Manaus	-	95,4	90,0	11,4	65,2	44,4	77,4
D6	Barcarena	122,6	-	192,8	108,0	86,4	65,6	30,4
D1	Porto Velho	74,6	150,0	-	66,0	119,8	99,0	132,0
D2	Itacoatiara	14,7	84,0	84,9	-	53,8	33,0	66,0
D3	Miritituba	73,3	67,2	143,5	58,6	-	16,2	49,2
D4	Santarém	57,1	51,0	127,3	42,4	20,8	-	33,0
D5	Santana	99,5	30,4	169,7	84,9	63,3	42,4	-

Fonte: Autor

Tabela 13 – Matriz de tempos de viagem em dias: balsas GNL

		O1	D6	D1	D2	D3	D4	D5
		Manaus	Barcarena	Porto Velho	Itacoatiara	Miritituba	Santarém	Santana
O1	Manaus	-	3,97	3,75	0,47	2,72	1,85	3,22
D6	Barcarena	5,11	-	8,04	4,50	3,60	2,73	1,27
D1	Porto Velho	3,11	6,25	-	2,75	4,99	4,12	5,50
D2	Itacoatiara	0,61	3,50	3,54	-	2,24	1,37	2,75
D3	Miritituba	3,05	2,80	5,98	2,44	-	0,67	2,05
D4	Santarém	2,38	2,12	5,30	1,77	0,87	-	1,37
D5	Santana	4,15	1,27	7,07	3,54	2,64	1,77	-

Fonte: Autor

- Com os resultados das etapas 2 e 3, pode-se então construir a Tabela 14, que resulta no consumo anual de MGO ou HFO para cada rota. O tempo típico de viagem foi obtido com a soma dos tempos de cada trecho da rota (ida e volta), com dados da Tabela 10. O consumo de energia na rota (coluna VII) é obtido multiplicando-se as colunas V e VI. O consumo de combustível por viagem é obtido com a conversão do consumo de valores energéticos para valores volumétricos, usando para isso o peso específico e o consumo específico de cada combustível. O número de viagens redondas por ano é obtido pelo quociente entre o total a ser transportado em cada rota anualmente (Tabela 3) e a capacidade de carga de cada comboio (Tabela 8). O consumo anual de MGO e HFO será, então, o produto das colunas IX e X.
- A partir da coluna X da Tabela 14, o consumo de GNL será estimado para três cenários de substituição (15%, 35% e 55%) e dois cenários de concentração de demanda (50% de demanda em cada extremidade da rota ou 100% de demanda nos portos de exportação, excluindo Porto Velho e Miritituba). Aplicando os coeficientes de conversão energética entre os combustíveis marítimos e o GNL (linhas 10 a 12 da Tabela 5), poder-se-á chegar à demanda potencial de GNL em cada cenário (Tabelas 15 a 17).

Tabela 14 – Consumo de combustível por viagem redonda

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
#	Nome	Combustível	Howe - Potência consumida por E/M (HP)	Potência consumida por E/M (kW)	Tempo típico de viagem (h)	Consumo de energia na rota (kW*h)	Consumo combustível por viagem (m ³)	Nº de viagens redondas por ano	Consumo anual por rota de HFO ou MGO (m ³)
1	PVH - ITA	HFO	2650	1976	228	450145	91	128	11682
2	PVH - STM	MGO	1600	1193	342	407679	88	111	9814
3	PVH - BAR	MGO	1600	1193	518	617695	134	111	14869
4	MTT - STM	MGO	2020	1506	56	84223	18	103	1871
5	MTT - BAR	HFO	2900	2163	232	501569	102	338	34365
6	MTT - SAN	MGO	2540	1894	170	321634	70	57	3973
TOTAL									76574

Fonte: Autor

Tabela 15 – Consumo de combustível por porto

Consumo por Porto: Cenário 1				Consumo por Porto: Cenário 2			
50% da demanda em cada ponta (abastecimento em cada trecho)				100% da demanda nos portos de exportação (abast. 1x p/ viagem redonda)			
#	Nome	Consumo anual de HFO (m ³)	Consumo anual de MGO (m ³)	#	Nome	Consumo anual de HFO (m ³)	Consumo anual de MGO (m ³)
D1	Porto Velho	5841,2	12341,4	D2	Itacoatiara	11682,4	0,0
D2	Itacoatiara	5841,2	0,0	D4	Santarém	0,0	11685,1
D3	Miritituba	17182,4	2922,3	D5	Santana	0,0	3973,1
D4	Santarém	0,0	5842,5	D6	Barcarena	34364,7	14869,1
D5	Santana	0,0	1986,5	TOTAL		46047,1	30527,3
D6	Barcarena	17182,4	7434,6				
TOTAL		46047,1	30527,3				

Fonte: Autor

Tabela 16 – Taxa de adoção de GN: Cenário de consumo 1

	15%			35%			55%		
	Consumo anual de gás natural (m ³)	Consumo diário de gás natural (m ³)	Consumo diário GNL (m ³)	Consumo anual de gás natural (m ³)	Consumo diário de gás natural (m ³)	Consumo diário GNL (m ³)	Consumo anual de gás natural (m ³)	Consumo diário de gás natural (m ³)	Consumo diário GNL (m ³)
D1	3.457.827,00	9.473,50	15,79	8.068.263,01	22.104,83	36,84	12.678.699,01	34.736,16	57,89
D2	1.161.721,42	3.182,80	5,30	2.710.683,31	7.426,53	12,38	4.259.645,21	11.670,26	19,45
D3	3.960.985,21	10.852,01	18,09	9.242.298,83	25.321,37	42,20	14.523.612,45	39.790,72	66,32
D4	1.087.000,64	2.978,08	4,96	2.536.334,83	6.948,86	11,58	3.985.669,02	10.919,64	18,20
D5	369.591,83	1.012,58	1,69	862.380,93	2.362,69	3,94	1.355.170,03	3.712,79	6,19
D6	4.800.498,33	13.152,05	21,92	11.201.162,77	30.688,12	51,15	17.601.827,20	48.224,18	80,37
TOTAL	14.837.624,44	40.651,03	67,75	34.621.123,68	94.852,39	158,09	54.404.622,93	149.053,76	248,42

Fonte: Autor

Tabela 17 – Taxa de adoção de GN: Cenário de consumo 2

	15%			35%			55%		
	Consumo anual de gás natural (m ³)	Consumo diário de gás natural (m ³)	Consumo diário GNL (m ³)	Consumo anual de gás natural (m ³)	Consumo diário de gás natural (m ³)	Consumo diário GNL (m ³)	Consumo anual de gás natural (m ³)	Consumo diário de gás natural (m ³)	Consumo diário GNL (m ³)
D2	2.323.442,84	6.365,60	10,61	5.421.366,63	14.853,06	24,76	8.519.290,41	23.340,52	38,90
D4	2.174.001,28	5.956,17	9,93	5.072.669,66	13.897,73	23,16	7.971.338,04	21.839,28	36,40
D5	739.183,65	2.025,16	3,38	1.724.761,86	4.725,37	7,88	2.710.340,07	7.425,59	12,38
D6	9.600.996,66	26.304,10	43,84	22.402.325,53	61.376,23	102,29	35.203.654,41	96.448,37	160,75
TOTAL	14.837.624,44	40.651,03	67,75	34.621.123,68	94.852,39	158,09	54.404.622,93	149.053,76	248,42

Fonte: Autor

É importante ressaltar, porém, que o consumo de combustível real é produto de diferentes fatores: depende do arranjo do comboio e de seu carregamento, da geometria do

casco do empurrador e de suas instalações propulsoras, das dimensões das barcaças, das condições ambientais e da velocidade de operação. O valor total anual obtido de consumo do sistema logístico poderá variar com a variação de qualquer um desses parâmetros.

4.3 Apresentação do Modelo Matemático

Como já dito anteriormente, o modelo matemático é uma variação do PRV multi-viagem. Segue sua formalização:

Conjuntos e índices

N	Conjunto de portos, índices p
N^D	Conjunto de nós de demanda da rede, índices i e j
R	Conjunto de viagens, índice r
V	Conjunto de balsas, índice k

Parâmetros

J_i	+1, se o porto i for de suprimento, e -1 se o porto i for de consumo
a_{pi}	Parâmetro binário que será 1 se o nó de demanda i se refere ao porto p , e 0, em caso contrário
Cap_k	Capacidade da balsa k (m^3 de GNL)
T_i^Q	Tempo para movimentação de um m^3 no nó i (dias)
T	Horizonte de planejamento (dias)
R_i	Taxa diária de produção ($J_i=+1$), ou taxa diária de consumo ($J_i = -1$) do nó i
$TW a_i$	Limite inferior da janela de tempo em que uma balsa deve chegar a um nó i de demanda da rede
$TW b_i$	Limite superior da janela de tempo em que uma balsa deve chegar a um nó i de demanda da rede
R_i	Taxa diária de produção ($J_i=+1$), ou taxa diária de consumo ($J_i = -1$) do nó i
T_{ijk}	Tempo de navegação entre os nós i e j com a balsa k (dias)
C_{ijk}^N	Custo de navegação entre os nós i e j da rede com a balsa k (R\$)
C_k	Custo de capital da balsa k (R\$)

Variáveis de decisão

$x_{ijk r}$	Variável binária que será 1 se a balsa k percorrer o arco (i, j) na viagem r , e 0, em caso contrário
z_k	Variável binária que será 1 se a balsa k for utilizada (incorporada à frota), e 0, em caso contrário
t_{ikr}	Variável contínua que registra o instante de início da operação no porto i pela balsa k na viagem r , e 0, em caso contrário
q_{ikr}	Variável contínua que registra o total carregado pela balsa k visando abastecer o porto i na viagem v

Expressões

$$\min C = \sum_k z_k C_k + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_r C_{ijk}^N x_{ijk r} \quad (0)$$

$$\sum_k \sum_r x_{0_r j k r} = 1 \quad \forall j \in N^D \quad (1)$$

$$\sum_{j \in N^D \cup \{0_{r+1}\}} x_{0_r j k r} = 1 \quad \forall k \in V, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N^D \cup \{0_r\}} x_{j 0_{r+1} k r} = 1 \quad \forall k \in V, \quad (3)$$

$$x_{0_r j k r} - x_{j 0_{r+1} k r} = 0 \quad \forall j \in N^D, \forall k \in V, \quad (4)$$

$$t_{j k r} \geq TW a_i x_{0_r j k r} \quad \forall j \in N^D, \forall k \in V, \quad (5)$$

$$t_{j k r} \leq TW b_i x_{0_r j k r} \quad \forall j \in N^D, \forall k \in V, \quad (6)$$

$$t_{j k r} \geq t_{0_r k r} + q_{j k r} T_{0_r}^Q + T_{ijk} - (1 - x_{0_r j k r}) T \quad \forall j \in N^D, \forall k \in V, \quad (7)$$

$$q_{j k r} \leq Cap_k x_{0_r j k r} \quad \forall j \in N^D, \forall k \in V, \quad (8)$$

$$t_{0_{r+1} k r} \geq t_{j k r} + q_{j k r} / R_j + T_{j 0_r k} - (1 - x_{j 0_{r+1} k r}) T \quad \forall j \in N^D, \forall k \in V, \quad (9)$$

$$t_{0_{r+1}kr} \geq t_{0_rkr} - (1 - x_{0_r0_{r+1}kr})T \quad \forall k \in V, \quad (10)$$

$$t_{0_rkr} \geq t_{0_rkr-1} \quad \forall k \in V, \quad (11)$$

$$\forall r \in R, r > 1$$

$$\sum_{j \in N^D} q_{jkr} a_{pj} \geq TR_j \quad \forall p \in P \quad (12)$$

$$x_{0_{r+1}0_{r+2}kr+1} \geq x_{0_r0_{r+1}kr} \quad \forall k \in V, \quad (13)$$

$$\forall r \in R$$

$$t_{jkr} + \frac{q_{jkr}}{R_j} \leq T \quad \forall j \in N^D, \forall k \in V, \quad (14)$$

$$\forall r \in R$$

$$z_k \geq \sum_{j \in N^D} x_{0_rjk1} \quad \forall k \in V \quad (15)$$

$$q_{jkr} \geq 0, t_{jkr} \geq 0 \quad \forall j \in N^D, \forall k \in V, \quad (16)$$

$$\forall r \in R$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N^D, \forall k \in V, \quad (17)$$

$$\forall r \in R$$

$$z_k \in \{0,1\} \quad \forall k \in V \quad (18)$$

A expressão (0) é a função objetivo do problema e contempla a parcela de custo de capital da frota e a parcela de custo de navegação. A restrição (1) impõe que cada nó de demanda da rede seja visitado por uma balsa, em uma determinada viagem. A restrição (2) impõe que saia um arco do nó de origem, associado a uma nova viagem, e que tenha como destino algum nó de demanda, ou o nó destino da viagem, indicando que a balsa não foi utilizada naquela viagem e nem será mais utilizada em viagens futuras. A restrição (3) opera de forma similar à restrição (2), e garante o mesmo balanço sob o ponto de vista do nó de destino, para onde deve convergir um arco, originado em um nó de demanda, ou originado no nó de origem daquela viagem.

A restrição (4) trata da equação de continuidade. Assim, um nó de demanda que recebe uma embarcação deve, ao final do período em que esta abasteceu as embarcações na região, enviar a embarcação de volta ao porto que irá abastecê-la novamente. A restrição (5) impõe um limite mínimo para a chegada da embarcação em um nó de demanda da rede, enquanto que a restrição (6) impõe um limite máximo para a chegada da embarcação em um nó de demanda da rede. A restrição (7) associa o instante de início da operação de abastecimento em

um nó de demanda, ao instante em que a balsa iniciou o seu carregamento no porto de oferta, somado ao tempo em que permaneceu carregando e ao tempo de navegação para chegar ao nó de demanda. A restrição (8) limita o máximo que pode ser transportado por uma balsa em função de sua capacidade volumétrica. A restrição (9) é similar à restrição (7) e associa o instante de início da operação de carregamento em um porto de oferta, ao instante em que a balsa iniciou a sua operação no nó de demanda, somado ao tempo em que ali permaneceu e ao tempo de navegação até o porto de oferta. A restrição (10) calcula o instante de início de um nó de oferta, quando a balsa não realizou nenhuma viagem. A restrição serve para manter a coerência na contagem do tempo. Também para garantir a coerência e continuidade no tempo, a restrição (11) vincula o instante de início das atividades de um nó de origem de uma nova viagem ao instante atribuído a esta variável em sua viagem anterior.

A restrição (12) impõe que a demanda seja atendida. Isso é garantido somando a demanda entregue nos nós de demanda correspondentes a cada porto, e impondo que esta soma seja maior ou igual à taxa projetada de demanda de gás nos portos, pela extensão do período de planejamento.

A restrição (13) tem for finalidade garantir a sequência correta das viagens. Por exemplo, seria indesejável que uma solução pulasse uma viagem antes de fazer uma próxima. Embora, sob o ponto de vista de uma solução real, não haver diferença, matematicamente é mais interessante manter as viagens que são realizadas sequencialmente, que o sejam também observando o índice da viagem. A restrição (14) impõe que o atendimento da demanda esteja compreendido dentro do horizonte de planejamento. Isto permite, por exemplo, que uma operação que terminou próximo ao final do horizonte de planejamento, e cuja balsa irá retornar a um porto de oferta, que a chegada da balsa ocorra após o período de planejamento, mas a demanda terá sido integralmente atendida. A restrição (15) contabiliza quantas balsas foram usadas, ao contar quantas fizeram a sua primeira viagem a um nó de demanda. Por último, as restrições (16) a (18) definem o domínio das variáveis de decisão.

Dois dos parâmetros mais importantes a serem introduzidos no modelo matemático são o custo de navegação entre os nós i e j da rede com a balsa GNL k (C_{ijk}^N), dado em R\$, e o custo de capital da balsa GNL k , em R\$.

Para se chegar a uma matriz de custos C_{ijk}^N , era preciso antes o emprego da Tabela 12 (tempos de viagem em horas para as balsas GNL) e ponderá-la pelo custo de navegação por balsa por hora. Esse valor é a soma das linhas 5 e 10 da Tabela 7 (custo do GNL disponível

para abastecimento), multiplicado pelo consumo de GNL na balsa (150 Nm³/h). O resultado é a Tabela 18.

Tabela 18 – Custos de navegação entre os portos i e j (R\$)

	O1	D6	D1	D2	D3	D4	D5	
	Manaus	Barcarena	Porto Velho	Itacoatiara	Miritituba	Santarém	Santana	
O1	Manaus	-	R\$ 42.926,57	R\$ 40.496,76	R\$ 5.129,59	R\$ 29.350,51	R\$ 19.978,40	R\$ 34.827,21
D6	Barcarena	R\$ 55.191,30	-	R\$ 86.778,77	R\$ 48.596,11	R\$ 38.876,89	R\$ 29.504,78	R\$ 13.667,66
D1	Porto Velho	R\$ 33.554,46	R\$ 67.494,60	-	R\$ 29.697,62	R\$ 53.918,54	R\$ 44.546,44	R\$ 59.395,25
D2	Itacoatiara	R\$ 6.595,19	R\$ 37.796,98	R\$ 38.182,66	-	R\$ 24.220,92	R\$ 14.848,81	R\$ 29.697,62
D3	Miritituba	R\$ 32.975,93	R\$ 30.237,58	R\$ 64.563,41	R\$ 26.380,75	-	R\$ 7.289,42	R\$ 22.138,23
D4	Santarém	R\$ 25.686,52	R\$ 22.948,16	R\$ 57.273,99	R\$ 19.091,33	R\$ 9.372,11	-	R\$ 14.848,81
D5	Santana	R\$ 44.777,85	R\$ 13.667,66	R\$ 76.365,32	R\$ 38.182,66	R\$ 28.463,44	R\$ 19.091,33	-

Fonte: Autor

Já os custos de capital C_k , foram estimados como uma proporção da capacidade volumétrica de carga das balsas, com uma relação de 0,24 toneladas de peso leve para cada m³ de capacidade de transporte. Os custos de capital para cada um dos três tamanhos de balsa GNL resultaram em:

Balsa 800 m³: R\$ 9.408.000,00

Balsa 600 m³: R\$ 7.056.000,00

Balsa 400 m³: R\$ 4.704.000,00.

5 Resultados e Análise de Sensibilidade

O modelo foi então testado para 36 diferentes condições, com base na variação de 4 parâmetros:

1. Quanto à fração da frota que adotará o GNL: o gás natural, sendo um combustível novo e de transição, dificilmente assumirá papel hegemônico na propulsão naval. Ele poderá ocupar um espaço crescente, mas é difícil prever em qual horizonte de tempo. Por isso, para a análise de sensibilidade, foram adotadas três faixas de adoção de GNL: **15, 35 e 55%**. Em outras palavras, em cada um desses casos, o *market share* do GNL no *mix* de combustíveis foi aumentando, com a crescente redução no consumo de MGO e HFO.
2. Quanto à velocidade de operação das balsas GNL: foram considerados os valores de **8 e 10 nós**. Um aumento na velocidade de toda a frota de abastecimento poderá resultar num consumo maior de combustível, mas também poderá significar uma frota menor, pois os tempos de deslocamento caem e a capacidade de atendimento aumenta;
3. Quanto à capacidade das balsas: como já mencionado anteriormente, a frota foi analisada para três capacidades: Balsas de **400 m³, 600 m³ e 800 m³**;
4. Quanto aos portos de abastecimento: foram considerados dois casos. O primeiro significa a possibilidade de **abastecimento dos empurradores em qualquer porto**, alocando com isso parte da demanda nos terminais que se encontram nas extremidades da rede. Na prática, isso resulta em viagens mais longas para as balsas de abastecimento, num deslocamento que tende a ser desnecessário, pois a maior parte dos empurradores já é projetada com tanques de combustível grandes o suficiente para fazer mais de uma viagem redonda (ida e volta). Por isso, o segundo caso considera a **desativação dos terminais de Porto Velho e de Miritituba como pontos de abastecimento de GNL**, ficando a demanda concentrada nos terminais da calha do rio Amazonas. Uma vantagem potencial desse segundo caso é que, como a profundidade é menos restrita no rio Amazonas do que em seus afluentes, qualquer rede logística dimensionada poderá prever embarcações com maior calado.

Os resultados estão consolidados na Tabela 19. Dos 36 casos, 9 não se mostraram viáveis, seja porque o lote de entrega estava incompatível com a embarcação, seja porque o a embarcação era grande e lenta demais, não atendendo a alguma das restrições. A solução de

menor custo resulta do caso 22: 6 balsas navegando a 10 nós, cada uma com capacidade de 400 m³ e com 15% da demanda direcionada ao GNL. Essa é a rede que cumpre o objetivo geral do trabalho. O caso 19 é quase idêntico, com um custo total muito semelhante, mas com a diferença da frota navegar mais lentamente.

Todos os tempos de processamento resultaram baixos. Mesmo os casos mais demorados não passaram de 5 minutos para o atingimento da solução ótima.

Tabela 19 – Resultados

#	Portos	Capac. Balsas GNL (m ³)	Veloc. (nós)	Nível Demanda (%)	Tempo de Proc. (s)	Custo Total (000 R\$)	Frota	Custo Frota (000 R\$)	Custo Navegação (000 R\$)	Distância Total (km)
1	TODOS	400	8	15	1	43.805,90	9	43.200,00	605,88	19.640
2	TODOS	400	8	35	300	49.000,70	10	48.000,00	1.000,73	32.440
3	TODOS	400	8	55	Inviável					
4	TODOS	400	10	15	1	43.706,30	9	43.200,00	506,30	19.640
5	TODOS	400	10	35	12	44.044,90	9	43.200,00	844,88	32.440
6	TODOS	400	10	55	300	58.928,60	12	57.600,00	1.328,62	50.660
7	TODOS	600	8	15	1	50.869,50	7	50.400,00	469,48	15.220
8	TODOS	600	8	35	4	65.566,30	9	64.800,00	766,26	24.840
9	TODOS	600	8	55	15	80.298,80	11	79.200,00	1.098,79	35.620
10	TODOS	600	10	15	1	50.797,90	7	50.400,00	397,87	15.220
11	TODOS	600	10	35	2	65.446,20	9	64.800,00	646,16	24.840
12	TODOS	600	10	55	2	72.935,20	10	72.000,00	935,17	35.620
13	TODOS	800	8	15	0	57.971,40	6	57.600,00	371,41	12.040
14	TODOS	800	8	35	0	87.005,90	9	86.400,00	605,88	19.640
15	TODOS	800	8	55	6	96.938,40	10	96.000,00	938,41	30.420
16	TODOS	800	10	15	0	57.907,60	6	57.600,00	307,58	12.040
17	TODOS	800	10	35	1	86.906,30	9	86.400,00	506,30	19.640
18	TODOS	800	10	55	12	96.795,30	10	96.000,00	795,31	30.420
19	S/ PVH e MTT	400	8	15	0	29.329,20	6	28.800,00	529,20	17.160
20	S/ PVH e MTT	400	8	35	3	44.178,80	9	43.200,00	978,80	31.740
21	S/ PVH e MTT	400	8	55	Inviável					
22	S/ PVH e MTT	400	10	15	0	29.270,00	6	28.800,00	470,02	17.160
23	S/ PVH e MTT	400	10	35	62	39.276,70	8	38.400,00	876,74	31.740
24	S/ PVH e MTT	400	10	55	Inviável					
25	S/ PVH e MTT	600	8	15	0	43.631,10	6	43.200,00	431,14	13.980
26	S/ PVH e MTT	600	8	35	Inviável					
27	S/ PVH e MTT	600	8	55	Inviável					
28	S/ PVH e MTT	600	10	15	0	36.379,70	5	36.000,00	379,73	13.980
29	S/ PVH e MTT	600	10	35	28	58.296,20	8	57.600,00	696,17	25.380
30	S/ PVH e MTT	600	10	55	Inviável					
31	S/ PVH e MTT	800	8	15	0	48.333,10	5	48.000,00	333,07	10.800
32	S/ PVH e MTT	800	8	35	Inviável					
33	S/ PVH e MTT	800	8	55	Inviável					
34	S/ PVH e MTT	800	10	15	0	48.289,40	5	48.000,00	289,44	10.800
35	S/ PVH e MTT	800	10	35	0	58.070,00	6	57.600,00	470,02	17.160
36	S/ PVH e MTT	800	10	55	Inviável					

Fonte: Autor

Nota-se que de fato é vantajoso desativar o abastecimento em Porto Velho e Miritituba. O custo médio total dos casos viáveis com todos os portos (R\$65,2 milhões) é 33,31% mais alto do que o custo médio total dos casos viáveis sem os portos citados (R\$43,5 milhões).

Quanto à capacidade das balsas GNL, nota-se uma baixa competitividade das balsas maiores, de 800m³, pois trata-se de capacidade excessiva em relação à demanda pelo gás. Caso haja uma maior demanda por GNL embarcado, especialmente num futuro em que navios de cabotagem e longo curso possam demandá-lo, o emprego por balsas de maior capacidade poderá ser justificado.

O nível de demanda mais vantajoso mostrou-se consistentemente como sendo o patamar de 15%, o que certamente está relacionado com o horizonte de planejamento de curto prazo adotado (30 dias). Em eventuais análises adicionais para prazos maiores, os custos de capital se diluirão com o tempo. Consequentemente, a vantagem do baixo custo operacional do GNL aumentará. Tal fato fica ainda mais claro ao notarmos que os custos de navegação representam no máximo 2,3% dos custos totais. Numa possível análise anualizada, certamente essa relação se aproximará de valores mais realistas e compatíveis com as realidades operacionais das empresas de navegação.

Quanto à velocidade, em todos os casos a velocidade mais alta resultou num desempenho melhor do sistema, ou pelo menos com um custo total praticamente inalterado.

Merece destaque também o fato de que a menor frota não resulta necessariamente em menores custos. Todos os três casos em que a frota especificada ficou em 5 balsas levaram a um custo total superior. Adicionalmente, as maiores frotas tampouco são as mais caras: os casos 15 e 18, que são os mais caros, atendiam a rede com uma frota de 10 balsas, duas a menos do que a maior frota obtida.

6 Conclusão e Pesquisas Futuras

Conclui-se que o gás natural é um combustível com grande potencial para a aplicação na navegação brasileira, especialmente na Amazônia. Com sobra de oferta e uma grande e ainda crescente demanda potencial, o que falta é o provimento de infraestrutura, preços mais alinhados com as práticas internacionais e um arcabouço regulatório mais favorável. A introdução paulatina do GNL como combustível marítimo no cenário internacional tenderá, no longo prazo, a influenciar na melhora das condições para o florescimento desse mercado também no Brasil. O gás pode ser cada vez mais identificado como uma excelente oportunidade ainda não aproveitada.

O modelo conceitual proposto foi capaz de aproximar o problema real, com o provimento de um conjunto de dados que ficarão disponíveis para os atores do setor. Porém, diversas premissas adotadas poderão ser alteradas, aumentando ainda mais a adesão do modelo à realidade. Como exemplos, pode-se citar a expansão do estudo de demanda para outros mercados além da navegação de comboios graneleiros, a consideração da sazonalidade da navegação, de maiores variações nas velocidades das embarcações e no estudo de cenários com mais pontos de oferta de gás na região norte.

O modelo matemático foi capaz de produzir resultados coerentes e prover uma ferramenta útil no auxílio à decisão do planejamento, tanto da infraestrutura de transportes como potencialmente da programação de embarcações dentro da frota de balsas de abastecimento de um operador individual. O modelo poderá ser testado com mais casos no futuro e num horizonte de tempo mais amplo. Uma análise econômica mais detalhada também poderá se mostrar uma ferramenta poderosa em eventuais estudos de viabilidade e análise da tomada de decisão de investimentos.

A rede logística proposta significa uma quantidade de balsas que podem ser fabricadas na própria região norte, seja pelo tamanho, seja pela quantidade. O sistema seria potencialmente atrativo mesmo para uma baixa adoção do gás natural na matriz energética da navegação de comboios graneleiros. A absorção de 15% do volume total de combustíveis é uma quantidade que pode ser atingida num prazo menor, não precisando de décadas para se concretizar.

O tema da propulsão naval mais sustentável segue com diversas lacunas ainda a serem pesquisadas. O Brasil ainda precisa amadurecer leis, regras e normas para acomodar as mudanças que estão ocorrendo. Um entendimento mais aprofundado do impacto no desenvolvimento da sociedade da adoção de combustíveis mais limpos como o GNL ainda

precisaria ser feito, incluindo impactos ambientais no ambiente amazônico, quantidade de geração de empregos, potencial de geração de valor e desenvolvimento tecnológico, entre outros.

Porém, uma das maiores lacunas permanece sendo o provimento de infraestrutura. Não apenas balsas de abastecimento precisariam ser construídas e operadas, mas também terminais de armazenamento e liquefação, terminais de compressão para disponibilização de CNG a aplicações de menor porte, terminais de transbordo, sistemas de recebimento de regaseificação, entre outros.

Com o envolvimento de diferentes participantes da cadeia de valor do gás natural e a resolução das diferentes barreiras que ainda permanecem, a transição energética do futuro poderá se aproximar do presente.

7 Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. *Dados Estatísticos*. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/dados-estatisticos>>. Acesso em 25/11/2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. *Resolução ANP Nº 16, de 17.06.2008 - DOU 18.06.2008*. Disponível em <<http://www.scgas.com.br/uploads/editores/20100720165420.pdf>>. Acesso em 30/11/2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. *Resolução ANP Nº 8, de 30.01.2015 - DOU 02.02.2015*. Disponível em <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=280722>>. Acesso em 28/11/2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. *Desempenho do Setor Aquaviário 2016 – Oportunidades e Melhorias Portuárias. Indicadores, Cargas, Navegação*. Disponível em <<http://antaq.gov.br/Portal/PDF/Anuarios/ApresentacaoAnuario2016.pdf>>. Acesso em 14/12/2017.

AHLFELDT, G., MOELLER, K., WENDLAND, N. *Chicken or egg? The PVAR econometrics of transportation*. Journal of Economic Geography. Volume 15, Edição 6, 1169–1193, 2014.

AMAGGI NAVEGAÇÃO. *Website institucional*. Disponível em <<http://amaggi.com.br/divisao-navegacao/>>. Acesso em 05/12/2017.

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING, ABS. *Propulsion and Auxiliary Systems for Gas Fueled Ships*. Houston, 2011.

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING, ABS. *Bunkering of Liquefied Natural Gas-fueled Marine Vessels in North America*. Houston, 2014.

ANDERSON, M., SALO, K., FRIDELL, E. *Particle- and Gaseous Emissions from an LNG Powered Ship*. Environmental. Science & Technology 49, 12568-12575, 2015.

ARENALES, M., ARMENTANO, V., MORABITO, R., YANASSE, H. *Pesquisa Operacional*. Elsevier, 2a Ed., 2015.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. *Cotações e Boletins. Cotações de Fechamento PTAX do DÓLAR DOS EUA*. Referência de 15/11/2017 a 15/12/2017. Disponível em <<http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpeq.asp?id=txcotacao>>. Acesso em 17/12/2017.

BECKER MARINE SYSTEMS. *LNG Hybrid Barge*. Disponível em <<https://www.becker-marine-systems.com/products/product-detail/becker-Ing-hybrid-barge.html>>. Acesso em 11/12/2017.

BERTRAND, J. W. M., FRANSOO, F. C. *Operations management research methodologies using quantitative modeling*. International Journal of Operations & Production Management. 22, 2. Pág 241, 2002.

BIZI, R., TISCHER, F. *Estudo de Emissões em Motor Dual Diesel e Gás Natural*. XXII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva, 2012.

BP. *BP Statistical Review of World Energy*. Londres, 2017. Disponível em <<https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>>. Acesso em 18/11/2017.

BRAEKERS, K., RAMAEKERS, K., VAN NIEUWENHUYSE, I. *The vehicle routing problem: State of the art classification and review*. Computers & Industrial Engineering. Volume 99, Pages 300-313, Setembro, 2016.

BRASIL ENERGIA. *O plano russo para a Amazônia*. N° 406, Setembro de 2014.

BRASIL ENERGIA. *GNV vai para reabilitação*. N° 410, Janeiro de 2015.

BRASIL ENERGIA. *Biometano na Rede*. N° 412, Março de 2015.

BRÄYSY, O., GENDREAU, M. *Vehicle routing problem with time windows, Part I: Route construction and local search algorithms*. Transportation Science, 39:1, p.104-118, 2005-a.

BRÄYSY, O., GENDREAU, M. *Vehicle routing problem with time windows, Part II: Metaheuristics*. Transportation Science, 39:1, p.119-139, 2005-b.

BRETT, B. C. *Potential Market for LNG-fueled Marine Vessels in the United States*. Dissertação de mestrado, Massachusetts Institute of Technology, 2008.

BRYNOLF, S., MAGNUSSON, M., FRIDELL, E., ANDERSSON, K. *Compliance possibilities for the future ECA regulations through the use of abatement technologies or change of fuels*. Transportation Research Part D 28 (2014) 6–18. Elsevier, 2014.

BRYNOLF, S., FRIDELL, E., ANDERSSON, K. *Environmental assessment of marine fuels: liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol*. Journal of Cleaner Production 74 (2014) 86e95. Elsevier, 2014.

BUREAU VERITAS, BV. *Safety Rules for Gas-Fuelled Engine Installations in Ships*. Paris, 2011.

BUREL, F., TACCANI, R., ZULIANI, N. *Improving sustainability of maritime transport through utilization of Liquefied Natural Gas (LNG) for propulsion*. Energy 57 (2013) 412e420. Elsevier, 2013.

CALDERÓN, M., ILLING, D., VEIGA, J. *Facilities for Bunkering of Liquefied Natural Gas in Ports*. Transportation Research Procedia 14, 2431-2440, 2016. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146516302940>>. Acesso em 12/12/2017.

CARVALHO, C. *Russos levam o sonho do petróleo de volta ao coração da Amazônia*. O Globo, 09/04/2017. Disponível em <<https://oglobo.globo.com/economia/russos-levam-sonho-do-petroleo-de-volta-ao-coracao-da-amazonia-21183438>>. Acesso em 05/12/2017.

CIGÁS, COMPANHIA DE GÁS DO AMAZONAS. *Correspondência com o setor comercial da empresa*. Data: 14/12/2017.

COMISSÃO DESIGNADA PELA PORTARIA MME N° 128/1995. *Suprimento de Energia Elétrica na Amazônia Legal - Relatório dos Estudos*. MME - DNDE - ELETROBRÁS - PETROBRÁS – ELETRONORTE, 1995.

CORBETT, J. J., THOMSON, H., WINEBRAKE, J. J. *Natural gas for waterborne freight transport: a life cycle emissions assessment with case studies*. University of Delaware, RIT, on assignment by the U.S. Department of Transportation / MARAD, 2014.

CORDEAU, J.F., LAPORTE, G., SAVELSBERGH, M. W. P., VIGO, D. *Vehicle Routing*. In: Barnhart, C., Laporte, G. (eds). *Transportation: Handbooks in Operations Research and Management Science*, vol. 14, p. 367-428. North-Holland: Amsterdam, 2006.

DAMEN. *Damen reacts to growing LNG market*. Press release online, 01/03/2017. Disponível em < http://www.damen.com/en/news/2017/03/damen_reacts_to_growing_lng_market>. Acesso em 11/12/2017.

DE JESUS, A. *Barcarena terá termelétrica a gás natural*. O Liberal Online, 01/05/2016. Disponível em < <http://www.ormnews.com.br/noticia/barcarena-tera-termeletrica-a-gas-natural>>. Acesso em 13/12/2017.

DENIZ, C., ZINCIR, B. *Environmental and economical assessment of alternative marine fuels*. *Journal of Cleaner Production*, 113, 438-449, 2016.

DET NORSKE VERITAS, DNV. *Modalities for the provisioning of LNG as shipping fuel in Flemish ports: PART II: Legal & Regulatory*. REPORT N° 13YB7C6-3, 2012.

DIESEL SERVICE AND SUPPLY. *Approximate Natural Gas Consumption Chart*. Disponível em <http://www.dieselserviceandsupply.com/Natural_Gas_Fuel_Consumption.aspx>. Acesso em 15/11/2017.

DNV GL. *(Future) Fuels & Fuel Converters*. Rev. 3.0, 2016. Disponível em <https://www.ntnu.edu/documents/20587845/1266707380/01_Fuels.pdf/1073c862-2354-ccf-9732-0906380f601e>. Acesso em 02/12/2017.

DNV GL. *Liquefied Natural Gas (LNG) Bunkering Study*. Report N°.: PP087423-4, Rev 3, 2014.

DNV GL. *LNGi Status Update, November 2017*. Disponível em <<https://www.dnvgl.com/maritime/mydnvgl-service-overview/lng-intelligence-lngi/index.html>>. Acesso em 30/11/2017.

EL GOHARY, M. M., SEDDIEK, I. S. *Utilization of alternative marine fuels for gas turbine power plant onboard ships*. *International Journal on Naval Architecture and Ocean Engineering*, 5:21-32, 2013.

ENTEC UK. *Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community*. Final Report to the European Commission. Julho, 2002.

FAIRPLAY IHS, *Viking Line orders advanced LNG ro-pax ferry from Chinese yard*. Disponível em <<https://fairplay.ihs.com/commerce/article/4278376/viking-line-orders-advanced-lng-ro-pax-ferry-from-chinese-yard>>. Acesso em 10/12/2017.

FAY, J. A. *Model of spills and fires from LNG and oil tankers*. *Journal of Hazardous Materials B96* (2003) 171–188. Elsevier, 2003.

FAY, J. A. *Spread of large LNG pools on the sea*. *Journal of Hazardous Materials 140* (2007) 541–551. Elsevier, 2007.

FOLHA DE S. PAULO. *Gigantes do agronegócio tentam gerar exportações por portos privados*. Publicação online, 30/06/2016. Disponível em <<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2016/06/1786722-gigantes-do-agronegocio-tentam-gerar-exportacoes-por-portos-privados.shtml>>. Acesso em 14/12/2017.

FURTADO, N., KAWAMOTO, E. *Avaliação de Projetos de Transporte*. Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Departamento de Transportes, 1997.

GCAPTAIN, *Shell to Build U.S.-Based LNG Bunkering Barge*. Disponível em <<http://gcaptain.com/shell-to-build-us-based-lng-bunkering-berge>>. Acesso em 11/12/2017.

GCAPTAIN, *U.S. Ready to Ship More Gas to Middle East*, reproduzindo texto da Agência *Bloomberg L.P.* Disponível em <<http://gcaptain.com/u-s-ready-ship-gas-middle-east/>>. Acesso em 11/12/2017.

GE, J. WANG, X. *Techno-economic study of LNG diesel power (dual fuel) ship*. WMU Journal of Maritime Affairs, 16:233–245, 2017.

GENPOWER, *Projeto Termoelétrico UTE GPSA BARCARENA*. Apresentação, Junho de 2016. Disponível em <<https://www.semas.pa.gov.br/wp-content/uploads/2016/06/Apresenta%C3%A7%C3%A3o-UTE-GPSA-BARCARENA.pdf>>. Acesso em 12/12/2017.

GERMANISCHER LLOYD, *Final Report: European Maritime Safety Agency (EMSA) – Study on Standards and Rules for bunkering of gas-fuelled Ships*, 2013. Disponível em <<http://emsa.europa.eu/news-a-press-centre/external-news/2-news/1714-study-on-standards-and-rules-for-bunkering-of-gas-fuelled-ships.html>>. Acesso em 12/04/2015.

GIL, A. C., *Como Elaborar Projetos de Pesquisa*. Editora Atlas, 4ª Edição. São Paulo, 2002. Disponível em <<http://docente.ifrn.edu.br/mauriciofacanha/ensino-superior/redacao-cientifica/livros/gil-a.-c.-como-elaborar-projetos-de-pesquisa.-sao-paulo-atlas-2002./view>>. Acesso em 08/12/2017.

GNANN, T., PLÖTZ, P., WIETSCHER, M. *How to address the chicken-egg-problem of electric vehicles? Introducing an interaction market diffusion model for EVs and charging infrastructure*. ECEEE Summer Study Conference Proceedings. Hyères, França, 2015.

G1 PARÁ. *Demora nas obras do Pedral do Lourenço afeta a economia no Pará*. Publicação online, 01/10/2017. Disponível em <<https://g1.globo.com/pa/para/noticia/demora-nas-obras-do-pedral-do-lourenco-afetam-a-economia-no-para.ghtml>>. Acesso em 09/12/2017.

G1 RIO. *Ivete vira nome de barco bicombustível*. Publicação online, 08/08/2008. Disponível em <<http://g1.globo.com/Noticias/Rio/0,,MUL716653-5606,00-IVETE+VIRA+NOME+DE+BARCO+BICOMBUSTIVEL.html>>. Acesso em 13/12/2017.

G1 RONDÔNIA. *BR 364 completa 33 anos de asfaltamento*. Publicação online, 2016. Disponível em <<http://g1.globo.com/ro/rondonia/videos/t/todos-os-videos/v/br-364-completa-33-anos-asfaltamento/6146203/>>. Acesso em 03/12/2017.

HAÏDAR, T. *The Barriers to a Small-Mid Scale LNG Future*. Oil and Gas iQ, 2015. Disponível em <<http://www.smallmidlng.com/media/1001074/40846.pdf>>. Acesso em 03/12/2017.

HALVORSEN-WEARE, E., FAGERHOLT, K. *Routing and scheduling in a liquefied natural gas shipping problem with inventory and berth constraints*. Annals of Operations Research 203:167–186, 2013.

HARVEY GULF, *Go Green website section*. Disponível em <<http://www.harveygulf.com/green.html>>. Acesso em 03/12/2017.

HELLENIC SHIPPING. *Japan LNG buyers pay \$9/MMBtu for spot contracts in Nov, up 10% on month: METI*. Citação original de dados da Platts. Disponível em <<http://www.hellenicshippingnews.com/japan-lng-buyers-pay-9-mmbtu-for-spot-contracts-in-nov-up-10-on-month-meti/>>. Acesso em 12/12/2017.

HOWE, C.W. *Mathematical Model of Barge Tow Performance*. Journal of the Waterways and Harbors Division, Vol. 93, Edição 4, Pg. 153-166, 1967.

HYDRO. *Carta de intenção e memorando de entendimento para o possível uso de gás natural na Hydro Alunorte*. Nota à imprensa, 12/01/2017. Disponível em <<https://www.hydro.com/pt-BR/a-hydro-no-brasil/Imprensa/Noticias/2017/carta-de-intencao-e-memorando-de-entendimento-para-o-possivel-uso-de-gas-natural-na-hydro-alunorte/>>. Acesso em 10/12/2017.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF OIL AND GAS PRODUCERS (IOGP). *Guidance on performing risk assessment in the design of onshore LNG installations including ship/shore interface*. IOGP, Draft 116901, 2013.

INTERNATIONAL GAS UNION, *LNG as Fuel, 2012-2015 Triennium Work Report*, Program Committee D2. Junho, 2015. Disponível em <http://gasnam.es/wp-content/uploads/2015/06/LNG_as_Fuel.FINAL_.2.pdf>. Acesso em 10/12/2017.

INTERNATIONAL GAS UNION, *Small Scale LNG, 2012-2015 Triennium Work Report*, Program Committee D3. Junho, 2015. Disponível em <[http://www.igu.org/sites/default/files/node-page-field_file/Small ScaleLNG.pdf](http://www.igu.org/sites/default/files/node-page-field_file/Small%20ScaleLNG.pdf)>. Acesso em 10/12/2017.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, *Interim Guidelines on Safety for Natural Gas-Fuelled Engine Installations on Ships*. Maritime Safety Committee, 86th Session. Annex 11, Resolution MSC.285(86), 2009. Disponível em <<http://www.epa.gov/region5/water/npdestek/badger/pdfs/Attachment-G-3.pdf>>. Acesso em 10/03/2014.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. *International Code of safety for ships using gases or other low-flashpoint fuels (IGF Code)*. Maritime Safety Committee, 95th Session. 2015. Disponível em <<http://www.imo.org/en/Publications/Pages/Home.aspx>>. Acesso em 07/11/2017.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973 as modified by the Protocol of 1978 – MARPOL 73/78*. Disponível em <<http://www.imo.org/en/Publications/Pages/Home.aspx>>. Acesso em 27/11/2017.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, *Third IMO GHG Study 2014. Executive Summary and Final Report*. Londres, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO. *ISO 8217:2010, Petroleum products -- Fuels (class F) -- Specifications of marine fuels*. Junho de 2010.

KHAN, M. I. *Policy options for the sustainable development of natural gas as transportation fuel*. Energy Policy 110, 126–136, 2017.

KIM, S.-J., HAN, M.-S., PARK, J.-C. *Corrosion behavior in 10% H₂C₂O₂.H₂O solution of austenite stainless steel for double wall gas pipe of dual fuel engine for liquefied natural gas ship*. Surface and Interface Analysis. 2012, 44, 1397 – 1400. Wiley, 2012.

KLAW LNG. *LNG Vessel Bunkering*. Disponível em <<https://www.klawlng.com/lng-applications/lng-vessel-bunkering/>>. Acesso em 12/12/2017.

KUWAHARA, N. *Análise do gás natural liquefeito como alternativa energética para os pequenos e médios sistemas isolados da Amazônia*. Dissertação de mestrado, Universidade de Campinas, 1999. Disponível em <http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/265571/1/Kuwahara_Nelson_M.pdf>. Acesso em 10/11/ 2017.

LAPORTE, G., OSMAN, I. H. *Routing problems: a bibliography*. Annals of Operations Research, 61, p.227-262, 1995.

LEHR, W., SIMECEK-BEATTY, D. *Comparison of hypothetical LNG and fuel oil fires on water*. Journal of Hazardous Materials 107 (2004) 3–9. Elsevier, 2014.

LIN, W., ZHANG, N., GU, A. *LNG (liquefied natural gas): A necessary part in China's future energy infrastructure*. Energy 35 (2010) 4383–4391. Elsevier, 2010.

LLOYD'S REGISTER. *Your options for emissions compliance – Guidance for shipowners and operators on the Annex VI SO_x and NO_x regulations*. Londres, 2015.

LLOYD'S REGISTER. *Rules and Regulations for the Classification of Natural Gas Fuelled Ships*. Londres, 2012.

LLOYD'S REGISTER & UMAS. *Zero-Emission Vessels 2030. How do we get there? Low Carbon Pathways 2050 series*. Londres, 2017. Disponível em <<http://www.lr.org/en/projects/zero-emission-vessels-2030.aspx>>. Acesso em 15/12/2017.

LNG MASTERPLAN FOR RHINE-MAIN-DANUBE, *E-Newsletter Issue N° 1, March 2014*. Disponível em <<http://www.lngmasterplan.eu/>>. Acesso em 20/03/2014.

LNG SHIP FUEL SAFETY ADVISORY GROUP. *Standards and Guidelines for Natural Gas Fueled Ships*. The Society of International Gas Carrier and Terminal Operators (SIGTTO), Society for Gas as a Marine Fuel (SGMF), 2013.

LNGTAINER. *LNGTainer Green Energy Logistics website*, 2017. Disponível em <<http://www.lngtainer.com/>>. Acesso em 14/12/2017.

LNG WORLD NEWS. *Germany boosting use of LNG as maritime fuel*. Publicado em 31/08/2017. Disponível em <<https://www.lngworldnews.com/germany-boosting-use-of-lng-as-maritime-fuel/>>. Acesso em 15/12/2017.

LNG WORLD NEWS. *North America's first LNG bunker barge construction contract signed*. Publicado em 25/02/2015. Disponível em <<https://www.lngworldnews.com/north-americas-first-lng-bunker-barge-construction-contract-signed/>>. Acesso em 11/12/2017.

- LOWELL, D., WANG, H., LUTSEY, N. *Assessment of the fuel cycle impact of liquefied natural gas as used international shipping*. International Council on Clean Transportation, 2013.
- MACHADO, G. B., DE MELO, T. C. C., LASTRES, L. F. M. *Utilização de Gás Natural em Motores e Cenário do Uso no Brasil*. Universidade Petrobras, 2007.
- MACIEL, F. *Gas-to-wire sem a distribuidora de gás*. E&P Brasil, 06/07/2017. Disponível em <<http://epbr.com.br/gas-to-wire-sem-a-distribuidora-de-gas/>>. Acesso em 08/12/2017.
- MACLEAN, K., SANSOM, R., WATSON, T., GROSS, R. *Managing Heat System Decarbonisation - Comparing the impacts and costs of transitions in heat infrastructure*. Final Report. Imperial College, Londres, 2016.
- MARINE LOG, *TOTAL to supply CMA CGM with (a lot of) LNG for box ship newbuilds*. Disponível em <http://www.marinelog.com/index.php?option=com_k2&view=item&id=27792:total-to-supply-cma-cgm-with-a-lot-of-lng-for-box-ship-newbuilds&Itemid=231>. Acesso em 11/12/2017.
- MARINE LOG, *Video: Plugging in Finland's first electric ferry*. Disponível em <http://www.marinelog.com/index.php?option=com_k2&view=item&id=27695:video-plugging-in-finland%E2%80%99s-first-electric-ferry&Itemid=226>. Acesso em 10/12/2017.
- MARITIME CYPRUS. *Seagas – the world's first fuelling vessel for LNG in Stockholm*. Publicado online em 17/07/2015. Disponível em <<https://maritimecyprus.com/2015/07/17/seagas-the-worlds-first-fuelling-vessel-for-lng-in-stockholm/>>. Acesso em 09/12/2017.
- MARINHA DO BRASIL. *Normas da Autoridade Marítima para Navegação em Mar Aberto, NORMAM-01*. Diretoria de Portos e Costas, Rio de Janeiro, 2005, última revisão em 2016.
- MARINHA DO BRASIL. *Normas da Autoridade Marítima para Navegação Interior, NORMAM-02*. Diretoria de Portos e Costas, Rio de Janeiro, 2005, última revisão em 2016.
- MAXWELL, D., ZHU, Z. *Natural gas prices, LNG transport costs, and the dynamics of LNG imports*. Energy Economics 33 (2011) 217–226. Elsevier, 2011.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. *Infraestrutura e Logística*. Publicação online, 31/01/2017. Disponível em <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/infraestrutura-e-logistica/infraestrutura-e-logistica>>. Acesso em 10/12/2017.
- MOKHATAB, S., MAK, J., VALAPPIL, J., WOOD, D. *Handbook of Liquefied Natural Gas*. 1ª Ed. Gulf Professional Publishing, Londres, 2014.
- MULLIGAN, R. F., LOMBARDO, G. A. *Short Sea Shipping – Alleviating the Environmental Impact of Economic Growth*. WMU Journal of Maritime Affairs, Vol. 5, No.2, 181–194, 2006.
- NIJBOER, M. *The Contribution of Natural Gas Vehicles to Sustainable Transport*. International Energy Agency, 2010.
- OBSERVATORY OF EUROPEAN INLAND NAVIGATION, OEIN. *Map of LNG market introduction in inland navigation, 2014*. Disponível em <<http://www.inland-navigation.org/map/>>. Acesso em 15/04/2015.

OGUNLOWO, O., BRISTOW, A. L., SOHAIL, M. *A stakeholder analysis of the automotive industry's use of compressed natural gas in Nigeria*. *Transport Policy* 53, 58–69, 2017.

PACHECO, J. *Ibama veta estudos de empresa para exploração de petróleo em área de corais no rio Amazonas*. G1 Amapá, 29/08/2017. Disponível em <<https://g1.globo.com/ap/amapa/noticia/ibama-veta-estudos-de-empresa-para-exploracao-de-petroleo-em-area-de-corais-no-rio-amazonas.ghtml>>. Acesso em 10/12/2017.

PAMPLONA, N. *Petrobras vende por US\$ 54,5 milhões campo de gás no Amazonas*. Folha de São Paulo, 22/11/2017. Disponível em <<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2017/11/1937498-petrobras-vende-por-us-545-milhoes-campo-de-gas-no-amazonas.shtml>>. Acesso em 14/12/2017.

PAMPLONA, N. *Rosneft quer terminal de GNL no Solimões*. *Brasil Econômico*, 29/05/2015. Disponível em <<http://brasileconomico.ig.com.br/negocios/2015-05-29/rosneft-quer-terminal-de-gnl-no-solimoes.html>>. Acesso em 07/12/2017.

PAPADOPOULOU, M. P., ANTONIOU, C. *Environmental impact assessment methodological framework for liquefied natural gas terminal and transport network planning*. *Energy Policy* 68 (2014) 306–319. Elsevier, 2014.

PEREIRA, R. *Fatia exportada pelo Arco Norte já chega a 24%*. *Jornal O Estado de S. Paulo online*. Disponível em <<http://economia.estadao.com.br/noticias/geral,fatia-exportada-pelo-arco-norte-ja-chega-a-24,70002081115>>. Acesso em 13/12/2017.

PETERS, J., WAINWRIGHT, S. *Solving the 'chicken and egg' problem of alternative fuels*. In: *The Review, European Edition*. Edição 49, pág. 6. Março de 2017. Disponível em <http://www.steerdaviesgleave.com/sites/default/files/rev49_v25_web_updated.pdf>. Acesso em 16/12/2017.

PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. – PETROBRAS. *Combustíveis Marítimos – Informações Técnicas*. Versão 1.1, Elaborada em 04/04/2013. Disponível em <<http://www.petrobras.com.br/minisite/assistenciaticnica/>>. Acesso em 28/11/2017.

PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. – PETROBRAS. *Gás Natural Liquefeito*. A018 - P29. Rio de Janeiro, 1991.

PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. – PETROBRAS. *Venda do Campo de Juruá na Bacia do Solimões*. *Fatos e Dados*, 22/05/2017. Disponível em <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/venda-do-campo-de-juru-na-bacia-de-solimoes.htm>>. Acesso em 14/12/2017.

PIELLISCH, R. *Gas Entec for LNG Bunker Barge for Tote*. *Fleet & Fuels online*, 10/01/2017. Disponível em <<http://www.fleetsandfuels.com/fuels/lng/2017/01/gas-entec-for-lng-bunker-berge>>. Acesso em 10/12/2017.

PORT OF YOKOHAMA. *Feasibility Study Report on the LNG bunkering hub development plan at the Port of Yokohama*. The Steering committee for LNG bunkering at the port of Yokohama, Dezembro de 2016. Disponível em <<http://www.mlit.go.jp/common/001157231.pdf>>. Acesso em 12/12/2017.

PORTOS E NAVIOS. *ANP vê quadro de mudanças profundas no mercado de gás natural do país*, reproduzindo texto do *Valor Econômico*. Disponível em: <<https://www.portosenavios.com.br/noticias/geral/41694-anp-ve-quadro-de-mudancas-profundas-no-mercado-de-gas-natural-do-pais>>. Acesso em 11/12/2017.

POSPIECH, P. *Natural Gas Use is on the rise for European Inland Waterway Shipping. Maritime Propulsion*, 19/09/2013. Disponível em <<http://articles.maritimepropulsion.com/article/Natural-Gas-Use-is-on-the-rise-for-European-Inland-Waterway-Shipping-1927.aspx>>. Acesso em 10/03/2014.

PROGRAMA DE PARCERIAS DE INVESTIMENTOS, PPI. *Ferrovias EF-170 – MT/PA – Ferrogrão. Andamento do projeto*. Disponível em <<http://www.projeto.crescer.gov.br/ef-170-mt-pa-ferrograo>>. Acesso em 03/12/2017.

REGAN, T. *Small Scale LNG: Emerging Technologies for Small-Scale Grids*. DataFusion Associates. SIEW Thinktank Roundtable, Cingapura, 27/10/2017. Disponível em <<http://esi.nus.edu.sg/docs/default-source/doc/small-scale-lng---esi-roundtable.pdf?sfvrsn=2>>. Acesso em 12/12/2017.

REVISTA ELO. *TWB lança primeiro ferryboat com sistema bicombustível*. Agosto-Setembro, 2008.

ROLLS-ROYCE. *10 years of LNG at sea*. Website corporativo, 2017. Disponível em <<https://www.rolls-royce.com/products-and-services/marine/lng.aspx#section-services>>. Acesso em 14/12/2017.

ROMEIRO, D. L. *O imbróglio da GásLocal (GNL Gemini) no CADE: defendendo a concorrência ou garantindo o monopólio?* In: Blog Infopetro, Grupo de Economia da Energia. Publicação online, 18/07/2016. Disponível em <<https://infopetro.wordpress.com/2016/07/18/o-imbroglio-da-gaslocal-gnl-gemini-no-cade-defendendo-a-concorrencia-ou-garantindo-o-monopolio/>>. Acesso em 14/12/2017.

ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING, RAE, *Future Ship Powering Options*. Londres, 2013. Disponível em <<https://www.raeng.org.uk/publications/reports/future-ship-powering-options>>. Acesso em 14/07/2017.

SANTIAGO, D. *Mar de Oportunidades: os investimentos em portos na região Norte do País começam a destravar a logística e facilitar as exportações*. Revista Dinheiro Rural online, 02/07/2015. Disponível em <<https://www.dinheirorural.com.br/secao/agronegocios/mar-de-oportunidades>>. Acesso em 09/12/2017.

SEMIN, R. A. B. *A Technical Review of Compressed Natural Gas as an Alternative Fuel for Internal Combustion Engines*. American J. of Engineering and Applied Sciences 1 (4): 302-311, 2008.

SEMPLE, N. *Pricing of LNG from Small Scale Facilities - Some Examples from Indonesia and Thailand*. LNG Global Congress Asia Pacific 2013. The Lantau Group, 2013. Disponível em <http://www.lantaugroup.com/files/ppt_LNG_congress13.pdf>. Acesso em 12/12/2017.

SETTI, J. R., WIDMER, J. A. *Tecnologia de Transportes*. Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Departamento de Transportes. 2ª Ed., 1997.

SEVERIANO, A. *30% da produção em gasoduto no AM fica sem uso e volta para a terra*. Portal G1 Amazonas, 2015. Disponível em <<http://g1.globo.com/am/ama-zonas/noticia/2015/04/30-da-producao-em-gasoduto-no-am-fica-sem-uso-e-volta-para-terra.html>>. Acesso em 15/04/2015.

SGMF - THE SOCIETY FOR GAS AS MARINE FUEL. *Gas as a marine fuel: an introductory guide*. SGMF, Londres, 2014.

SILVA, D. W. R. *Análise de falhas e suas consequências na operação de navios transportadores de gás natural liquefeito (GNL)*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, 2013.

STÅLHANE, M., RAKKE, J. G., MOE, C. R., ANDERSSON, H., CHRISTIANSEN, M., FAGERHOLT, K. *A construction and improvement heuristic for a liquefied natural gas inventory routing problem*. *Computers & Industrial Engineering* 62, 245–255, 2012.

STILES, T. *Demand for liquefied natural gas in Japan after Fukushima*. In *Leaders in Energy*, 09/11/2016. Disponível em <<https://lercpa.org/Ing-japan/>>. Acesso em 12/12/2017.

STOPFORD, M. *Maritime Economics*. Routledge, Londres, 2009.

STUER-LAURIDSEN, F., NIELSEN, J. B., ODGAARD, T., BIRKELAND, M., GRAUGAARD, C. W., BLIKOM, L. P., MURO-SUNÉ, N., ANDERSEN, M., ØVLISEN, F. *Natural Gas for Ship Propulsion in Denmark – Possibilities for using LNG and CNG on ferry and cargo routes*. Danish Ministry of the Environment, 2010. Disponível em <<http://aapa.files.cms-plus.com/PDFs/Danish%20Study.pdf>>. Acesso em 14/04/15.

TAHA, H. A. *Operations Research: An Introduction* 9a Ed. Prentice Hall, 2010.

THE MARITIME EXECUTIVE. *Singapore and Belgium Plan to 'Harmonize' LNG Bunkering*. Publicado online em 14/11/2013. Disponível em <<https://maritime-executive.com/article/Singapore-and-Belgium-Plan-to-Harmonize-LNG-Bunkering-2013-11-14>>. Acesso em 08/12/2017.

THE MOTORSHIP. *The gas giants: CMA CGM's landmark LNG orders*. Disponível em: <<http://www.motorship.com/news101/Ing/the-gas-giants-cma-cgms-landmark-Ing-orders>>. Acesso em 11/12/2017.

THOMAS, K. *Total seeks 18,000 m³ LNG bunker-supply newbuilding*. *Container Shipping & Trade* online, 31/10/2017. Disponível em <http://www.containerst.com/news/view,total-seeks-18000-m7614-Ing-bunkersupply-newbuilding_49701.htm>. Acesso em 12/12/2017.

THOMSON, H. CORBETT, J. J., WINEBRAKE, J. J. *Natural gas as a marine fuel*. *Energy Policy* 87. 153–167, 2015.

TZANNATOS, E., NIKITAKOS, N. *Natural gas as a fuel alternative for sustainable domestic passenger shipping in Greece*. *International Journal of Sustainable Energy*, Vol. 32, Nº. 6, 724–734, 2013.

UNITED STATES ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (U.S. EIA). *Natural Gas Data*. Disponível em <<https://www.eia.gov/naturalgas/data.php>>. Acesso em 25/11/2017.

VAN DER WERF, H. *LNG as fuel in inland navigation*. Central Commission for the Navigation on the Rhine, 2013.

VEJA. *Base de exploração de petróleo e gás natural da Petrobras na província petrolífera de Urucu, na bacia do Rio Solimões*. Créditos da imagem: Márcio Rodrigues. Publicação online, 23/12/2011. Disponível em <<http://veja.abril.com.br/economia/petrobras-encontra-novos-indicios-de-petroleo-na-amazonia>>. Acesso em 03/12/2017.

VERNENGO, G., RIZZUTO, E. *Ship synthesis model for the preliminary design of a fleet of compressed natural gas carriers*. *Ocean Engineering* 89 (2014) 189–199. Elsevier.

VIANA, M., HAMMINGH, P., COLETTE, A., QUEROL, X., DEGRAEUWE, B., DE VLIENER, I., VAN AARDENNE, J. *Impact of maritime transport emissions on coastal air quality in Europe*. Atmospheric Environment 90 (2014) 96 e 105. Elsevier, 2014.

WAN, C., YAN, X., ZHANG, D., SHI, J., FU, S., NG, A. K. Y. *Emerging LNG-fueled ships in the Chinese shipping industry: a hybrid analysis on its prospects*. WMU Journal of Maritime Affairs, 14:43–59, 2015.

WANG, S., NOTTEBOOM, T. *The Adoption of Liquefied Natural Gas as a Ship Fuel: a Systematic Review of Perspectives and Challenges*. Transport Reviews Vol. 34, N° 6, 749-774, 2014.

WÄRTSILÄ. *Turning to gas for ship power*. Publicado em 05/04/2012. Disponível em <<https://www.wartsila.com/twentyfour7/energy/turning-to-gas-for-ship-power>>. Acesso em 14/12/2017.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Heat Values of Various Fuels*. Setembro de 2016. Disponível em <<http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx>>. Acesso em 14/12/2017.

XU, J. TESTA, D., MUKHERJEE, P. K. *The Use of LNG as a Marine Fuel: The International Regulatory Framework*. Ocean Development & International Law, 46:225–240, 2015.

YOO, B-Y. *Economic assessment of liquefied natural gas (LNG) as a marine fuel for CO₂ carriers compared to marine gas oil (MGO)*. Energy 121, 772-780, 2017.

ZAPAROLLI, D. *Hidroviás reduzem distâncias e custos no escoamento da soja*. Jornal Valor Econômico online, 29/03/2016. Disponível em <<http://www.valor.com.br/empresas/4501090/hidrovi-as-reduzem-distancias-e-custos-no-escoamento-da-soja>>. Acesso em 14/12/2017.

ZHANG, Y., YANG, X., BROWN, R., YANG, L., MORAWSKA, L., RISTOVSKI, Z., FU, Q. HUANG, C. *Shipping emissions and their impacts on air quality in China*. Science of The Total Environment. Volumes 581–582, Páginas 186-198. Elsevier, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716327851>>. Acesso em 03/12/2017.