EDMILSON ROBERTO RODRIGUES

**LOGÍSTICA DE BAIXO CARBONO: AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA
DO MODAL CABOTAGEM NO TRANSPORTE DE LONGA
DISTÂNCIA**

SÃO PAULO

2019

EDMILSON ROBERTO RODRIGUES

**LOGÍSTICA DE BAIXO CARBONO: AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA
DO MODAL CABOTAGEM NO TRANSPORTE DE LONGA
DISTÂNCIA**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências.

Área de Concentração:
Sistemas Logísticos

Orientador:
Prof. Dr. Cláudio Barbieri da Cunha

SÃO PAULO

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 18 de fevereiro de 2019

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Rodrigues, Edmilson Roberto

LOGÍSTICA DE BAIXO CARBONO: AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO
MODAL CABOTAGEM NO TRANSPORTE DE LONGA DISTÂNCIA / E. R.
Rodrigues – versão corr. - São Paulo, 2019.

163 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Cabotagem porta-a-porta 2.Dióxido de carbono 3.Transportes intermodal
4.Transportes rodo-fluvial I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

*Dedico este trabalho à minha esposa
Karen e aos meus filhos Thaís, Roberto e
Ricardo por toda a compreensão e apoio
demonstrados durante esses anos de
estudos.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar eu agradeço a Deus por ter me proporcionado mais essa importante vitória durante meus 50 anos de vida, pela saúde e capacidade de seguir estudando e aprendendo a cada dia.

Compartilho esta conquista com minha esposa Karen, que sempre esteve ao meu lado, incentivando e apoiando para que eu pudesse completar este estudo. Além disso, em muitas situações ao longo desses anos, ela teve que cuidar sozinha dos nossos filhos para que eu pudesse dedicar meus finais de semana e noites para os estudos, e por isso, o meu muito obrigado. Aos meus filhos Thaís, Roberto e Ricardo pela compreensão, paciência, por entenderem que nem sempre eu podia estar junto deles e, principalmente, por serem minha maior fonte de alegria e motivação.

Tenho que agradecer também aos meus pais, Ismael e Aparecida. Durante toda minha vida eles têm sido motivo de inspiração e sempre me motivaram a seguir aprendendo e buscando o crescimento profissional e pessoal. Sempre demonstraram amor e carinho. Me proporcionaram uma vida simples, mas cheia de fé e esperança. Colocaram sempre os estudos como prioridade e me ensinaram a ser uma pessoa honesta e determinada.

Ao Professor Dr. Claudio Barbieri da Cunha por ter me apoiado durante esse mestrado e me desafiado a fazer sempre algo melhor. Também admiro sua paixão pelo ensino e sua capacidade de conduzir tantos temas em paralelo, tantos alunos e tantos estudos que são fundamentais para o crescimento do mundo acadêmico.

Às professoras Dra. Simone Miraglia e Dra. Daniela Bartholomeu pela disponibilidade em participar da minha banca examinadora, pelas palavras de apoio e pelos comentários tão valiosos realizados durante o exame de qualificação, que possibilitaram uma adequação e melhoria significativa dessa dissertação.

Agradeço ao amigo Demóstenes Medeiros por ter sido a primeira pessoa a me incentivar a realizar o mestrado. Nossas conversas sobre a vida executiva e sobre os planos de longo prazo me fizeram perceber um caminho onde a vida executiva poderia unir-se com a vida acadêmica e, agora, estou completando parte desse caminho.

Ao amigo Marcio Salmi por ter me fornecido os dados de consumo dos navios e por ter me ajudado a entender um pouco sobre embarcações.

Por fim, agradeço às minhas irmãs Márcia, Elaine e Kátia, que sempre me apoiaram, incentivaram e me ajudaram a ser uma pessoa melhor.

RESUMO

Este estudo estima e compara as emissões de CO₂ entre os dois modos de transporte intermodais mais utilizados no Brasil, para cargas com origem e destino ao município de Manaus, Estado do Amazonas. O primeiro é denominado cabotagem porta-a-porta, tem o contêiner como unidade de transporte e é caracterizado pela utilização da navegação em rios e/ou oceano como modalidade principal, complementado por caminhões para os trechos rodoviários na origem e destino. O segundo modo de transporte consiste na combinação do modo fluvial com rodoviário, conhecido no mercado brasileiro como rodo-fluvial. Nesse modal, a unidade de transporte é usualmente a carreta-baú, que percorre uma parte do trajeto sobre uma barcaça (trecho fluvial) e outra parte conectada a um cavalo-mecânico (trecho rodoviário). Através da aplicação dos métodos de cálculo baseados na energia ou atividade (*energy-based or activity-based approach*) foi possível realizar uma comparação das emissões de forma bastante abrangente. Na literatura existem diversos estudos que destacam a eficiência do modal aquaviário em relação ao modal rodoviário. No entanto, esses estudos analisam as emissões sem considerar todas as etapas envolvidas, como coleta e entrega, e movimentação portuária. Dessa forma, esses estudos podem estar deixando de computar quantidades importantes de emissões quando fazem essas comparações. Nesse estudo, a comparação contempla todas as etapas e permite que ao analisarmos os resultados, possamos entender exatamente em qual etapa do processo as emissões são mais significativas. Os resultados apurados apontam uma clara vantagem ambiental do modal cabotagem porta-a-porta, emitindo até 40% menos CO₂ que o modal rodo-fluvial no trecho entre Manaus e São Paulo. De igual forma, mostra-se também mais eficiente mesmo em trechos de menor distância, como entre Manaus e Recife, onde as emissões na cabotagem porta-a-porta são 54% inferiores ao modal rodo-fluvial. Quando comparado com rotas puramente rodoviárias, como entre Porto Alegre e Recife, a cabotagem porta-a-porta emite 63% menos CO₂ que o modal alternativo.

Palavras-chave: Dióxido de carbono; emissão de CO₂; transporte intermodal; cabotagem; porta-a-porta; contêiner; rodo-fluvial; aquaviário; transporte de carga.

ABSTRACT

This study estimates and compares CO₂ emissions between the two modalities of intermodal transport most used in Brazil for cargo with origin and destination to the municipality of Manaus, State of Amazonas. The first is called door-to-door cabotage, has the container as a transport unit and is characterized by the use of river and/or ocean navigation as the main modality, complemented by trucks for the road sections at the origin and destination. The second mode is the combination of the fluvial and road modal, known in the Brazilian market as a fluvial highway. In this modality, the transport unit is usually the trailer, which travels part of the route on a barge (river sections) and another part connected to a tractor (road sections). Through the application of the energy-based or activity-based approach, it was possible to compare the emissions in a very comprehensive way. In the literature there are several studies that highlight the efficiency of the waterway modal in relation to the road modal. However, these studies analyze emissions without considering all the steps involved, such as pick-up and delivery and port handling. Thus, these studies may be failing to compute significant amounts of emissions when making such comparisons. In this study, the comparison contemplates all the steps and allows that when analyzing the results, we can understand exactly at which stage of the process the emissions are more significant. The results obtained indicate a clear environmental advantage of the modal cabotage door-to-door, emitting up to 40% less CO₂ than the combined fluvial and road modal in the stretch between Manaus and São Paulo. Similarly, it is also shown to be more efficient even in smaller distances, such as between Manaus and Recife, where the emissions in the door-to-door cabotage are 54% lower than the alternative (fluvial-road) modal. When compared to purely road routes, such as between Porto Alegre and Recife, the door-to-door cabotage emits 63% less CO₂ than the alternative modal.

Keywords: carbon dioxide; CO₂ emission; intermodal transportation; cabotage; door-to-door; container transportation; fluvial-road; waterborne transportation; coastal shipping; cargo transportation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Consumo de petróleo por setor	3
Figura 1.2 - Matriz de transportes no Brasil	4
Figura 1.3 – Matriz de transportes na Europa (exclui Aéreo).....	5
Figura 1.4 - Matriz de transporte nos Estados Unidos em 2015	5
Figura 2.1 - Rotas intermodais entre Manaus e São Paulo.....	12
Figura 3.1 – Modelo de veículo para transporte rodoviário de contêiner de 40 pés	71
Figura 3.2 – Operação de carga e descarga em terminal portuário.....	71
Figura 3.3 – Operação de movimentação de contêiner em pátio.....	72
Figura 3.4 - Operação de carregamento e descarregamento de navio.....	72
Figura 3.5 – Exemplo de navio utilizado na cabotagem.....	73
Figura 3.6 – Exemplo de veículo utilizado no transporte rodoviário	74
Figura 3.7 - Exemplo de terminal fluvial	74
Figura 3.8 - Exemplo de barcaça fluvial Ro-Ro.....	75
Figura 3.9 - Metodologia aplicada para cálculo do modal cabotagem porta-a-porta	89
Figura 3.10 - Metodologia aplicada para cálculo do modo alternativo	90
Figura 4.1 - Trechos do serviço de cabotagem e portos atendidos	94
Figura 4.2 – Consumo de combustível por viagem completa	95
Figura 4.3 – Peso médio transportado em cada viagem (t/TEU)	97
Figura 4.4 – Nível de utilização em TEU por trecho de viagem	99
Figura 4.5 – Nível de utilização em peso por trecho de viagem.....	100
Figura 4.6 – Emissões de CO ₂ da etapa rodoviária-origem	102
Figura 4.7 - Emissões de CO ₂ da etapa porto-origem.....	102
Figura 4.8 - Emissões de CO ₂ do trecho aquaviário.....	105
Figura 4.9 – Emissões de CO ₂ da etapa porto-destino	105
Figura 4.10 – Emissões de CO ₂ da etapa rodoviária-destino	106
Figura 4.11 – Participação de cada etapa nas emissões da cabotagem porta-a-porta.....	107
Figura 4.12 – Emissões de CO ₂ da etapa rodoviária-origem	108
Figura 4.13 – Emissões de CO ₂ da etapa porto fluvial-origem	108
Figura 4.14 – Emissões de CO ₂ da etapa trecho aquaviário	109

Figura 4.15 – Emissões de CO ₂ da etapa porto fluvial-destino	109
Figura 4.16 – Emissões de CO ₂ da etapa rodoviária-viagem	110
Figura 4.17 – Participação de cada etapa nas emissões do transporte rodo-fluvial	111
Figura 4.18 – Comparação das emissões de CO ₂ entre os modos de transporte	117
Figura 4.19 - Emissões totais de CO ₂ por peso de carga	118
Figura 4.20 - Distância rodoviária no destino para cada modo de transporte	120
Figura 4.21 - Comparação das emissões de CO ₂ por destino de carga	123
Figura 4.22 – Emissões de CO ₂ por modo de transporte e rota	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - TPB total e número de embarcações com bandeira brasileira.....	18
Tabela 2.2 - Emissões brasileiras em CO ₂ eq por setor - em Gg.....	27
Tabela 2.3 - Comparativo entre as abordagens estudadas.....	39
Tabela 2.4 - Comparativo entre os métodos estudados.....	41
Tabela 2.5 - Fatores de emissão utilizados no Inventário 2007 - IMO	42
Tabela 2.6 - Emissões mundiais de CO ₂ de transporte marítimo.....	42
Tabela 2.7 - Índices comparativos das emissões de CO ₂ por navio porta-contêiner para o trajeto entre os portos de Macapá e Santos.....	45
Tabela 2.8 – Emissões de CO ₂ comparativas dos modos rodoviário e de cabotagem.....	46
Tabela 2.9 - Emissões de CO ₂ por tipo de veículo - em g/t.km.....	46
Tabela 2.10 - Fatores de emissão de CO ₂ por tipo de combustível - em kg/TJ...	49
Tabela 2.11 - Fatores de emissão de CO ₂ para transporte fluvial/barcaças.....	50
Tabela 2.12 - Fatores de emissão de CO ₂ para o transporte rodoviário.....	51
Tabela 2.13 - Fatores de emissão de CO ₂ por combustível – transporte rodoviário.....	53
Tabela 2.14 - Valores médios de consumo e distância percorrida para veículos do ciclo diesel.....	53
Tabela 2.15 - Distância percorrida por litro de diesel para caminhões pesados - em km/l.....	54
Tabela 2.16 - Fatores de emissão de CO ₂ para o modal rodoviário - Tier 1.....	54
Tabela 2.17 - Comparativo dos fatores de emissão de CO ₂ por autor e organização para cada modalidade de transporte.....	56
Tabela 2.18 - Fatores de conversão de tipo de contêiner para TEU.....	59
Tabela 2.19 - Comparativo de emissões de CO ₂ entre terminais de Rotterdam e Santos Brasil.....	61
Tabela 2.20 - Avaliação das metodologias de cálculo de emissões.....	62
Tabela 2.21 - Índice de temas abordados na revisão da literatura.....	64
Tabela 2.22 - Temas abordados por Autor.....	65
Tabela 3.1 - Dados utilizados no cálculo do modal cabotagem.....	69
Tabela 3.2 - Dados utilizados no cálculo do modal alternativo.....	70
Tabela 3.3 - Estimativa de emissão de CO ₂ por distância percorrida.....	77

Tabela 3.4 - Estimativa de emissão de CO2 por distância rodoviária percorrida..	85
Tabela 3.5 - Critérios de uniformização entre TEU e carreta-baú para comparação de emissões.....	88
Tabela 4.1 - Dados técnicos das embarcações.....	93
Tabela 4.2 - Consumo, quantidade de TEU e peso transportado.....	96
Tabela 4.3 - Dados por trecho – subida e descida.....	98
Tabela 4.4 - Consumo de combustível por TEU para cada trecho de viagem – em kg.....	100
Tabela 4.5 - Emissões de CO2 entre Manaus e Santos – método Energy-based	103
Tabela 4.6 - Emissão de CO2 por TEU.km – método CCWG.....	104
Tabela 4.7 - Emissão de CO2 entre Manaus e Santos – método CCWG.....	104
Tabela 4.8 - Emissões de CO2 do transporte de cabotagem para 1 TEU – em kg.....	106
Tabela 4.9 – Emissões de CO2 do transporte rodo-fluvial por carreta-baú – em kg.....	110
Tabela 4.10 – Emissões de CO2 da cabotagem após uniformização – Energy-based – em kg.....	112
Tabela 4.11 – Emissões de CO2 por modal com diferentes métodos e fatores de emissão – em kg.....	113
Tabela 4.12 - Emissões de CO2 para transporte marítimo/aquaviário.....	114
Tabela 4.13 – Emissões de CO2 segundo o nível de utilização dos navios – método Energy-based.....	115
Tabela 4.14 – Emissões de CO2 segundo o nível de utilização dos navios – CCWG.....	115
Tabela 4.15 - Emissões totais de CO2 da cabotagem por nível de utilização dos navios.....	116
Tabela 4.16 - Emissões totais de CO2 da cabotagem por destino de carga – Energy-based – em kg.....	121
Tabela 4.17 - Emissões totais de CO2 da cabotagem por destino de carga – CCWG – em kg.....	121
Tabela 4.18 – Emissões de CO2 do transporte rodo-fluvial por destino de carga – BNDES – em kg.....	121

Tabela 4.19 – Emissões de CO2 do transporte rodo-fluvial por destino de carga – Literatura – em kg.....	122
Tabela 4.20 - Critério de uniformização entre TEU e carreta-baú.....	124
Tabela 4.21 – Emissões de CO2 da cabotagem por TEU – em kg.....	126
Tabela 4.22 - Emissões totais uniformizadas de CO2 da cabotagem por rota – em kg.....	127
Tabela 4.23 - Emissões totais de CO2 do modo alternativo por rota – em kg.....	127

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABAC	Associação Brasileira dos Armadores de Cabotagem
AIS	<i>Automatic Identification System</i>
AMVE	<i>Automated Mutual Assistance Vessel Rescue System</i>
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
BSI	<i>British Standards Institution</i> (Instituto Britânico de Padrões)
CCWG	<i>Cargo Clean Working Group</i>
CDP	<i>Carbon Disclosure Project</i> (Projeto de Divulgação de Carbono)
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CMV-TAEM	<i>Commercial Marine Vessel Traffic and Air Emissions Model</i>
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
COADS	<i>Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set</i>
CORINAIR	<i>Core Inventory Air Emissions</i>
DEFRA	<i>Department for Environment, Food and Rural Affairs</i>
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DWT	<i>Dead Weight Tonnage</i> (quanto de peso um navio pode carregar, incluindo o peso da carga, combustível, água, lastro, provisões, passageiros e tripulação)
EEA	<i>European Environment Agency</i> (Agência Europeia de Meio-Ambiente)
EIA	<i>Energy Information Administration</i> (Administração de Informações de Energia)
EMEP	<i>European Monitoring and Evaluation Programme</i> (Programa de Monitoramento e Avaliação Europeu)
EPA	<i>US Environmental Protection Agency</i> (Agência Americana de Proteção Ambiental)
FEU	<i>Fourty foot equivalent unit</i> (Unidade equivalente a 40 pés)
FTL	<i>Full Truck Load</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
GHG	<i>Greenhouse Gas</i> (Gases de Efeito Estufa)

GNV	Gas Natural Veicular
GWP	<i>Global Warming Potencial</i> (Potencial de Aquecimento Global)
ICOADS	<i>International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set</i>
IMO	<i>International Maritime Organization</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental de Mudança Climática)
ISLSCP	<i>International Satellite Land Surface Climatology Project Initiative</i>
LMIU	<i>Lloyd's Marine Intelligence Unit</i>
LRS	<i>Lloyd's Register System</i>
LTL	<i>Less than Truck Load</i>
MCA	<i>Maritime Coastal Area</i>
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Informação
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MMM	<i>Ministry of Mercantile Marine</i>
MT	Ministério dos Transportes
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONU	Organização das Nações Unidas
PAS	<i>Publicly Available Specification</i> (Especificação Disponível Publicamente)
PIM	Polo Industrial de Manaus
PNLT	Plano Nacional de Logística e Transporte
PNMC	Política Nacional sobre a Mudança do Clima
PPA	<i>Piraeus Port Authority</i>
SOLAS	<i>Safety of Life at Sea</i>
SSS	<i>Short Sea Shipping</i> (navegação de curta distância)
STEAM	<i>Ship Traffic Emission Assessment Model</i>
SUFRAMA	Superintendência da Zona Franca de Manaus
TEU	<i>Twenty-foot Equivalent Unit</i> (Contêiner de 20 pés)
TPB	Tonelagem de Porte Bruto
TRENDS	<i>Transport and Environment Database System</i>

UNDP	<i>United Nations Development Program</i> (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento)
UNECE	<i>United Nations Economic Commission for Europe</i>
UNFCCC	Convenção Quadro da ONU sobre a Mudança do Clima
USACE	<i>U.S. Army Corps of Engineers</i>
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i> (Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável)
WRI	<i>World Resource Institute</i> (Instituto de Recursos Mundiais)
ZFM	Zona Franca de Manaus

LISTA DE SÍMBOLOS

CF ₄ - C ₂ F ₆	Perfluocarbonos
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO _{2eq}	CO ₂ Equivalente
g	Grama
g/kWh	Grama por quilowatts-hora
g/TEU.km	Gramas por TEU por quilômetro
g/t.km	Gramas por tonelada-quilômetro
Gg	Milhares de toneladas
g-km	Grama por quilômetro
GT	<i>Gross Tonnage</i>
HC	Hidrocarbonetos
HFC	Hidrofluorocarbonos
kg	Quilograma
kg/km	Quilograma por quilômetro
kg/TEU	Quilograma por TEU
kg/TJ	Quilograma por terajoule
kg/t	Quilograma por tonelada
km	Quilômetro
km/l	Quilômetro por litro
hp	<i>Horse power</i>
Kt	Milhares de toneladas
kW	Quilowatts
kWh	Quilowatts hora
l	Litro
m ³	Metro cúbico
Mt	Milhões de toneladas
N ₂ O	Óxido Nitroso
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
PFCs	Perfluocarbonos

PM	Material Particulado
PM _{2.5}	Material Particulado com diâmetro aerodinâmico menor que 2.5 µ
SF ₆	Hexafluoreto de Enxofre
SO ₂	Dióxido de Enxofre
t	Tonelada
t/d	Tonelada por dia
t/h	Tonelada por hora
t.km	Tonelada-quilômetro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação	1
1.2 Relevância do problema	2
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo Principal.....	6
1.3.2 Objetivos Secundários.....	7
1.4 Justificativa.....	7
1.5 Organização do trabalho.....	8
2. REVISÃO DA LITERATURA	10
2.1 A intermodalidade no transporte	11
2.2 A cabotagem porta-a-porta e o modo alternativo	14
2.2.1 Cabotagem	14
2.2.2 Rodo-fluvial.....	20
2.2.3 Rodoviário	22
2.3 As mudanças climáticas e os gases de efeito estufa	23
2.4 Metodologia para cálculo das emissões	29
2.4.1 Abordagens de cálculo das emissões	30
2.4.2 Modelos de cálculo	39
2.4.3 Emissões do modal aquaviário/marítimo e fluvial.....	41
2.4.4 Emissões do modal rodoviário.....	51
2.4.5 Emissões marítimas segundo o CCWG	56
2.4.6 Emissões em terminais portuários.....	59
2.5 Síntese da revisão bibliográfica	61
3. MÉTODO DE CÁLCULO.....	66
3.1 Premissas gerais do método de cálculo.....	67
3.2 Detalhamento dos dados utilizados para cálculo	69
3.3 Detalhamento das etapas do modal cabotagem porta-a-porta	70
3.4 As etapas do modo alternativo.....	73
3.5 Método de cálculo de emissões para a cabotagem porta-a-porta	75
3.5.1 Etapa rodoviária-origem e rodoviária-destino	76

3.5.2	Etapa porto-origem e porto-destino	77
3.5.3	Etapa trecho aquaviário/marítimo	78
3.6	Método de cálculo de emissões para o modo alternativo	82
3.6.1	Etapa rodoviária-origem e rodoviária-destino	82
3.6.2	Etapa porto fluvial-origem e porto fluvial-destino	83
3.6.3	Etapa trecho aquaviário	84
3.6.4	Etapa transporte rodoviário-viagem	85
3.7	Crítérios para uniformização dos resultados	86
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	91
4.1	Análise de dados e cálculo de consumo do trecho aquaviário da cabotagem	92
4.1.1	Dados das embarcações e do serviço de cabotagem	92
4.1.2	Dados da movimentação de carga e consumo de combustível	94
4.1.3	Cálculo do consumo de combustível por TEU transportado	100
4.2	Emissões da cabotagem porta-a-porta	101
4.3	Emissões do modo alternativo (Rodo-fluvial)	107
4.4	Crítérios para uniformização das emissões	111
4.5	Comparação dos resultados apurados no trecho aquaviário da cabotagem com a literatura	113
4.6	Análise de sensibilidade	114
4.6.1	Nível de utilização dos navios	114
4.6.2	Perfil da carga transportada	117
4.6.3	Distância do trecho rodoviário na origem ou destino	119
4.7	Emissões para outras rotas de transporte	123
4.8	Limitações das Estimativas	128
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	130
5.1	Revisão bibliográfica	130
5.2	Método de cálculo	131
5.3	Resultados apurados	132
5.4	Sugestão para trabalhos futuros	134
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136

1. INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) têm grande impacto no aquecimento global, o que vem causando alterações climáticas significativas em nosso planeta (IPCC, 2014). A atividade de transporte, devido ao alto uso de combustíveis fósseis, é um grande emissor de GEE, sendo o dióxido de carbono (CO₂) o mais representativo entre os gases emitidos (ANDRADE; MATTEI, 2011).

A cabotagem é definida pela Lei Nº 9.432 de 8 de janeiro de 1997 como a navegação realizada entre portos ou pontos do território brasileiro, utilizando a via marítima ou esta e as vias navegáveis interiores. É ainda pouco representativa na matriz de transporte brasileira (MT, 2010) sendo utilizada em grande escala no transporte de combustíveis e derivados de petróleo, representando 45,4% da capacidade em tonelagem da frota brasileira (ANTAQ, 2012). Ao longo dos últimos 12 anos passou a ser uma alternativa interessante de transporte de carga geral com o crescimento do transporte em contêineres, suportado pelo aumento da capacidade em tonelagem para esse tipo de carga (ANTAQ, 2012). Ao mesmo tempo, passou a ter maior importância no transporte entre longas distâncias com a entrada em operação de mais empresas de navegação, possibilitando frequência e confiabilidade nos prazos de entrega. As empresas de navegação de cabotagem passaram a oferecer serviço porta-a-porta, de forma a simplificar a gestão logística para os embarcadores de carga e poderem assim, competir diretamente com as empresas de transporte rodoviário.

Devido à crescente demanda por transporte entre o Distrito Industrial de Manaus e as regiões Sul e Sudeste do Brasil, combinada com a necessidade de busca por alternativas de transporte que emitam menos gases, a presente pesquisa pretende selecionar e propor um método para validar o quão mais eficiente é o transporte de cabotagem de carga containerizada no trecho entre Manaus e São Paulo. Essa validação será feita através da estimativa das emissões de dióxido de

carbono durante o transporte de cabotagem porta-a-porta, utilizando dados reais de consumo fornecidos por uma empresa de navegação de cabotagem brasileira para o trecho aquaviário. A metodologia utilizada para o cálculo da cabotagem porta-a-porta contempla as etapas de coleta e transporte rodoviário até o porto de origem, a operação portuária, o trecho aquaviário, a operação no porto de destino e o último trecho rodoviário até a entrega da carga. Como o acesso por estradas a Manaus é praticamente inexistente, o modal alternativo à cabotagem é conhecido como rodo-fluvial, pois contempla a combinação de dois modais de transporte: o rodoviário e o fluvial.

Através da identificação das metodologias utilizadas pela comunidade acadêmica, bem como da seleção da mais apropriada, como as abordagens *top-down* e *bottom-up* (CORBETT; KOEHLER, 2003; MIOLA; CIUFFO, 2011; EYRING et al., 2005), as emissões de CO₂ serão estimadas para possibilitar a comparação do nível de eficiência que cada modal oferece, podendo ser aplicada de forma geral para qualquer tipo de produto transportado ou de qualquer origem para qualquer destino.

1.2 Relevância do problema

Segundo a 5ª edição do Relatório sobre a Mudança Climática elaborado pelo Painel Intergovernamental de Mudança Climática (IPCC, 2014), o aumento da temperatura média na superfície é causado muito provavelmente pelo já observado aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE). O referido relatório também ressalta que o setor de transporte é responsável por aproximadamente 23% do total de emissões de CO₂ relacionadas ao consumo de energia. O IPCC também enfatiza o quão grande é o desafio de reduzir as emissões de GEE globalmente, uma vez que o crescimento contínuo nas atividades de transporte de passageiros e carga poderia superar todas as medidas aplicadas para minimizar as emissões globais (IPCC, 2013).

A 4ª edição do relatório do IPCC, divulgada em 2007, relatou um aumento de 0,74 graus Célsius na temperatura média global da superfície nos últimos cem anos, podendo atingir um acréscimo médio da temperatura global de 2 a 5,8 graus Célsius ainda nesse século, caso não sejam tomadas providências. Segundo Cisneros e Brinati (2009) o dióxido de carbono (CO₂) é o gás que mais impacta negativamente o aquecimento global tendo em vista a quantidade total de emissões.

Nesse contexto de preocupação global, o Brasil instituiu em 2009 a Política Nacional sobre a Mudança do Clima (PNMC), através da Lei nº 12.187, onde assumiu voluntariamente o compromisso de reduzir as suas emissões entre 36,1% e 38,9% até 2020 (MMA, 2009). Segundo o Balanço Energético Nacional, ano-base 2012, o consumo de derivados de petróleo pelo setor de transportes (Figura 1.1) corresponde a mais de 60% do total de derivados de petróleo consumido no país (MME,2013).

Figura 1.1 - Consumo de petróleo por setor

Fonte: EPE (2013)

Como o dióxido de carbono (CO₂) é emitido principalmente durante o uso de combustíveis fósseis, representando em torno de 80% das emissões de GEE (LIAO; TSENG; LU, 2009), a busca contínua por meios mais eficientes de transporte representa não apenas uma oportunidade, mas uma necessidade.

A preocupação com o impacto da escolha do modal de transporte nas emissões de GEE está claramente explicitada no Plano Nacional de Logística e Transporte - 2011 (PNLT) elaborado pelo Ministério dos Transportes. O objetivo do PNLT é equilibrar a matriz de transportes até 2025 com redução da participação do modal rodoviário e aumento nos demais. O benefício esperado na redução das emissões de CO₂ com a maior participação dos outros modais é da ordem de 32% para 2025 quando comparado a 2005 (MT, 2012), conforme Figura 1.2. No entanto, segundo ILOS (2017), a matriz de transporte brasileira evoluiu muito pouco ao longo dos últimos anos, com o transporte aquaviário representando apenas 12,6% no ano 2016, e o transporte rodoviário representando mais de 62% do total transportado. Dessa forma, torna-se difícil avaliar a eficácia desse PNLT.

Figura 1.2 - Matriz de transportes no Brasil

Fonte : MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES (2012)

Quando comparamos a concentração do modo de transporte rodoviário no Brasil com outras partes do mundo, observamos que o desafio de mudar a matriz não é uma questão enfrentada apenas pelo Brasil. Segundo o Relatório Anual de Estatísticas de Transporte 2016 (EUROSTAT, 2016), o modal rodoviário ainda representava quase 75% de todo o volume de carga transportada (excluindo o modal aéreo) na Europa em 2015. Da mesma forma, a participação do modal aquaviário (*inland waterways*) também é bastante pequena, conforme Figura 1.3.

Figura 1.3 – Matriz de transportes na Europa (exclui Aéreo)

Fonte: EUROSTAT (2016)

Nos Estados Unidos é possível observar que existe uma concentração do transporte rodoviário mais em linha com o percentual brasileiro. Por outro lado, o transporte pelo modal dutoviário é bem mais desenvolvido nos Estados Unidos que no Brasil, conforme Figura 1.4.

Figura 1.4 - Matriz de transporte nos Estados Unidos em 2015

Fonte: BUREAU OF TRANSPORTATION STATISTICS (2016)

A Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2014) ressalta que as políticas públicas devem sustentar um maior uso dos meios de transporte menos

poluentes em detrimento dos mais poluentes. Também reitera o papel das políticas públicas na revisão ou alteração da matriz de transporte, devido à grande concentração em transportes rodoviários.

Apesar de o Brasil apresentar um dos menores índices de emissão de CO₂ de origem energética do mundo, segundo Poole *et al.* (1998), as estatísticas ressaltam que a participação relativa das emissões no setor de transportes é uma das mais elevadas mundialmente. Isso ocorre porque o setor de transportes é o maior consumidor direto de combustíveis fósseis, sendo dominante o modal rodoviário, tanto de cargas como de passageiros. Segundo esses autores, o setor de transporte foi responsável por 49,7% das emissões do país em 1996, seguido pelo setor industrial, com 34% das emissões totais.

É importante observar que, dada a necessidade constante de busca de aumento de competitividade, o valor do frete/custo de transporte e o tempo de viagem, são fatores muito importantes a serem considerados para a escolha da solução de distribuição. Com a crescente conscientização sobre o impacto dos transportes na emissão de GEE, é esperado que o nível de emissão tenha relevância cada vez maior na escolha do modal a ser utilizado. Outro fator importante é a implementação de políticas públicas que privilegie a utilização de alternativas logísticas mais eficientes, algo que até o presente momento não tem sido explorado no Brasil.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Principal

O objetivo principal da pesquisa é examinar os métodos de cálculo de emissões de CO₂ existentes e selecionar o mais adequado para calcular as emissões de cada etapa do transporte do modal cabotagem porta-a-porta e do modal alternativo, possibilitando assim uma comparação do nível de eficiência de cada modal.

Além de comparar as emissões entre os dois modos de transporte base nessa pesquisa, espera-se que o método utilizado possa ser replicado para outras rotas de transporte e com a combinação de outras modais.

1.3.2 Objetivos Secundários

- Identificar qual o limite máximo de trecho rodoviário na origem ou destino para que a cabotagem porta-a-porta continue sendo mais eficiente que o modal alternativo.
- Compreender qual o impacto que o índice de ocupação dos navios pode ter no nível de eficiência da cabotagem.

1.4 Justificativa

Diversos estudos destacam a maior eficiência do modal marítimo ou aquaviário em relação ao modal rodoviário. Por exemplo, Liao, Tseng and Lu, (2009) apontam uma menor emissão de CO₂ também para casos de intermodalidade, onde a combinação do modal rodoviário com o aquaviário resulta vantagem em relação ao modal rodoviário apenas, mesmo que a custa de uma distância total maior. No entanto, tais estudos limitam a comparação apenas ao trecho de viagem marítimo ou aquaviário, não considerando fatores fundamentais, como a movimentação de carga nos portos e o transporte da origem até o porto de embarque e do porto de destino até o destinatário final. Dessa forma, a avaliação de que o transporte aquaviário é sempre mais eficiente que o rodoviário pode estar equivocada, uma vez que a distância percorrida entre o ponto de origem e o porto de embarque ou entre o porto de desembarque e o ponto de destino podem gerar emissões significativas de gases de efeito estufa, sem que os mesmos estejam sendo considerados nas avaliações realizadas.

Dessa forma, pretende-se que esse trabalho sirva para complementar outras metodologias existentes além de adicionar uma nova visão sobre o nível de

eficiência do transporte por cabotagem, mas agora de uma maneira abrangente, não apenas considerando o trecho marítimo.

A Região de Manaus é grande produtora de diversos produtos e contempla uma população de aproximadamente dois milhões de pessoas. Dado a importância dessa região e sua localização, os modais rodo-fluvial e cabotagem caracterizam-se como importantes opções para o transporte de cargas produzidas em Manaus e para o abastecimento da cidade. Como ambos contemplam toda a cadeia de transporte desde o ponto inicial de carregamento da carga até a sua efetiva entrega ao destinatário final, o entendimento dos impactos ambientais gerados por cada um desses modos de transporte pode ser usado pelas diversas empresas produtoras, localizadas na Zona Franca de Manaus, na definição de seu plano estratégico de logística, visando a priorização do modal de transporte mais eficiente para distribuição de seus produtos acabados. Além disso, empresas envolvidas com a venda de crédito de carbono poderiam beneficiar-se desse modal de transporte. À medida que o tema ambiental se torna mais e mais relevante globalmente, empresas que possam demonstrar suas ações para redução das emissões de CO₂ poderiam ter vantagens comerciais e ganhos de imagem. Da mesma forma, pode ser utilizado no aprimoramento das políticas governamentais para redução dos gases de efeito estufa e do aquecimento global, permitindo a elaboração de programas que estimulem a migração para o modal de transporte menos poluente.

1.5 Organização do trabalho

O capítulo 2 contempla uma ampla revisão da bibliografia sobre esse tema, iniciando com o tema da intermodalidade, seguido por uma breve introdução a cada modal de transporte, cabotagem, rodo-fluvial e rodoviário. Segue com um panorama do problema global sobre as mudanças climáticas e os efeitos causados pelos gases de efeito estufa, além das metodologias para cálculo das emissões mais utilizadas por diversos autores, bem como as abordagens de cálculo, os modelos e os fatores de emissão. Ao final encontra-se uma breve síntese dos principais pontos discutidos na revisão da literatura.

O capítulo 3 apresenta os métodos de cálculo utilizados para cada modo de transporte, iniciando com as premissas gerais e seguido por um detalhamento das etapas do percurso para a cabotagem porta-a-porta e para o transporte rodo-fluvial. Na sequência, os métodos de cálculo da cabotagem e do rodo-fluvial são detalhados. Por último, é apresentado o critério de uniformização dos resultados de emissões entre os modais.

O resultado do cálculo das emissões encontra-se no capítulo 4. Inicia-se com a análise dos dados fornecidos pela empresa brasileira de cabotagem seguido pelo cálculo do consumo de combustível por TEU. Na sequência constam os resultados para cada etapa da cabotagem porta-a-porta e para o rodo-fluvial. Segue com a uniformização dos resultados para possibilitar a comparação entre os modos de transporte, acompanhada por uma comparação entre o resultado apurado no trecho aquaviário da cabotagem com resultados disponíveis na literatura. Na continuação encontra-se uma análise de sensibilidade e conclui com o cálculo de emissões para outras rotas de transporte.

O capítulo 5 traz a conclusão dessa dissertação, com uma síntese da revisão da literatura e dos métodos aplicados. Inclui ainda um resumo dos resultados apurados e sugere temas que possam ser estudos para complementar ou aprimorar esse trabalho.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Esse capítulo apresenta uma revisão da literatura relacionada ao tema, com a finalidade de servir como base para a definição do método de cálculo de emissões para essa dissertação.

Na primeira parte, seção 2.1, é abordado o tema da intermodalidade e sua importância no transporte entre Manaus e as demais regiões do país. Inclui também uma breve introdução sobre a Zona Franca de Manaus e sua importância para a economia brasileira.

Na sequência (seção 2.2), é apresentado o modo de transporte cabotagem. Além de trazer um entendimento sobre sua origem e sua forma de operação, traz também dados de tipos de equipamentos utilizados, desafios e vantagens em relação ao modo de transporte alternativo. Também apresenta o modo rodo-fluvial e suas características.

A seção 2.3 detalha a questão sobre a mudança climática e os gases de efeito estufa, os acordos internacionais sobre o clima e meio-ambiente e a importância dos inventários de emissões.

Em seguida, a seção 2.4 apresenta as metodologias utilizadas para cálculo das emissões, com ênfase no transporte marítimo ou aquaviário. No entanto, para complementar esse trabalho e possibilitar a comparação entre modais, inclui também uma revisão sucinta sobre outros modais de transporte, como o fluvial e sobre operações portuárias com contêineres.

Ao final, seção 2.5, encontra-se uma análise sintetizada da literatura.

2.1 A intermodalidade no transporte

JONES, W. BRAD; CASSADY, C. RICHARD; BOWDEN JR (2000) pesquisaram sobre as diversas definições de intermodalidade e sugeriram como definição padrão o transporte de carga ou a movimentação de pessoas envolvendo mais de um modal de transporte, durante uma jornada simples e sem interrupções. Já Medina *et al* (2012) descrevem a intermodalidade como o transporte de uma carga, sem manipulação de seu conteúdo durante o transporte, por, ao menos, dois modais diferentes. Em termos documentais, cada modal emite seu próprio documento de transporte (denominado conhecimento de transporte) e a responsabilidade pela carga é dividida entre os transportadores segundo seu trecho de operação. Por outro lado, a multimodalidade, que não é um termo universal, mas sim bem específico no Brasil, requer um Operador de Transporte Multimodal – OTM que emite apenas um documento de transporte englobando toda a operação desde o ponto de origem até o destino final. Esse OTM é o responsável pela carga durante todo o trajeto, independente dos trechos serem operados por diferentes transportadoras.

Dada a posição geográfica da ZFM, localizada no coração da floresta amazônica, o acesso por rodovias é atualmente limitado, fazendo com que o uso da intermodalidade seja a maneira possível para movimentação de cargas que chegam e saem dessa região. Os meios mais comuns para transporte de carga geral originadas ou destinadas às regiões Sul, Sudeste e Nordeste do país são por via rodo-fluvial e cabotagem. Parte da região Centro-Oeste é atendida pelo modal rodo-fluvial, mas algumas regiões conseguem ser atendidas apenas pelo modal rodoviário, como é o caso do Estado de Mato Grosso, conforme Figura 2.1. O modal aéreo também é utilizado para transporte de produtos de alto valor agregado, tendo como principal vantagem a rapidez e segurança, mas como desvantagem o alto custo de frete.

Os dois principais pontos de interligação de carga do modal hidroviário para o rodoviário são Belém e Porto Velho, conforme Figura 2.1. A distância entre Manaus e Belém é de 1.606 km e de 1.211 km entre Manaus e Porto Velho. A

hidrovia do Amazonas, que conecta Manaus a Belém, é responsável por 65% de toda a carga transportada na região, o que faz com que a principal rota de transporte rodo-fluvial seja através de Belém. Tomando-se como exemplo a cidade de Cajamar, no estado de São Paulo, como destino final da carga, é possível observar que não há grande diferença no trecho rodoviário, uma vez que a distância entre Belém e Cajamar, por rodovia é de 2.875 km enquanto a distância entre Porto Velho e Cajamar é de 2.925 km.

A Figura 2.1 destaca as rotas intermodais, sendo a rota de cabotagem destacada com as setas azuis, via navegação por oceano até a entrada no Rio Amazonas, próximo a cidade de Macapá. As setas pretas assinalam a rota rodo-fluvial via Belém e as setas amarelas a rota rodo-fluvial via Porto Velho.

Figura 2.1 - Rotas intermodais entre Manaus e São Paulo

Fonte: Elaboração própria

Segundo a história disponível no website da SUFRAMA (2013), a Zona Franca de Manaus (ZFM) foi criada em 1957, inicialmente como Porto Livre, através da Lei nº 3.173 de 06 de junho. Em 1967, o Governo Federal ampliou a legislação e reformulou o modelo, estabelecendo incentivos fiscais por 30 anos para a implantação de um polo industrial, comercial e agropecuário na Amazônia. O objetivo foi viabilizar uma base econômica na Amazônia Ocidental, promover a melhor integração produtiva e social dessa região ao país, garantindo a soberania nacional sobre suas fronteiras. Em 1968, parte dos benefícios da ZFM foi estendida à Amazônica Ocidental (Amazonas, Acre, Rondônia e Roraima) com o objetivo de promover a ocupação dessa região e elevar o nível de segurança para manutenção da sua integridade. O prazo de validade desses incentivos foi prorrogado algumas vezes, tendo a Emenda Constitucional nº 42, de 19 de dezembro de 2003, alterado o prazo de vigência do modelo de 2013 para 2023. Existem atualmente diversas frentes de discussão no Congresso Nacional sobre uma potencial extensão do prazo de vigência por mais 50 anos.

A ZFM compreende três polos econômicos: comercial, industrial e agropecuário. O polo comercial teve maior representação até o final dos anos 80, devido ao regime de economia fechada adotada no Brasil. O industrial é considerado a base de sustentação da ZFM e possui aproximadamente 600 indústrias de alta tecnologia, gerando mais de 500 mil empregos, diretos e indiretos, principalmente nos segmentos eletroeletrônicos, duas rodas e químico. O polo agropecuário abriga projetos voltados à atividade de produção de alimentos, agroindústria, piscicultura, turismo, beneficiamento de madeira, entre outras (SUFRAMA, 2013). O Relatório de Indicadores de Desempenho do Polo Industrial de Manaus (SUFRAMA, 2013) aponta para um crescimento de 35% no faturamento total das empresas instaladas entre o período de 2008 e 2012. Além das empresas atualmente instaladas na Amazônia Ocidental, grande maioria delas na ZFM e usuárias de transporte nos diversos modais disponíveis, existe mais de 250 projetos de instalação de novas empresas em andamento, o que certamente vai gerar uma demanda ainda maior por transporte ao longo dos próximos anos. A Figura 2.2 apresenta o faturamento das empresas que operam no Polo Industrial de Manaus no período entre 2011 e 2015.

Figura 2.2 - Receita gerada pelas empresas do Polo Industrial de Manaus

Fonte: (SUFRAMA, 2016)

Segundo a SUFRAMA (2016), durante o ano 2015 foram produzidos mais de 15 milhões de aparelhos celulares, 1.2 milhões de motocicletas, 9.5 milhões de televisores, 9.3 milhões de relógios de pulso e 3.5 milhões de forno micro-ondas, dentre diversos outros produtos. Além da importância que tem por seu polo industrial, a região de Manaus possui mais de 2 milhões de habitantes, que consomem muitos produtos que são produzidos em outras regiões do país, como calçados, roupas, material de construção, produtos alimentícios e de higiene e limpeza. Boa parte dos insumos utilizados no processo produtivo em Manaus são produzidos em outros Estados brasileiros e necessitam chegar até lá.

2.2 A cabotagem porta-a-porta e o modo alternativo

2.2.1 Cabotagem

De acordo com Santos (2013), o termo Cabotagem é derivado do nome de família do navegador veneziano do século XVI Sebastião Caboto, que explorou a costa da América do Norte ao margeá-la, da Flórida à foz do rio São Lourenço, no atual Canadá. A serviço da Coroa da Espanha, Caboto adentrou o rio da Prata pelo litoral, em 1527, marcando assim sua chegada à América do Sul. Ele estava em

busca da mítica Serra da Prata, numa expedição que durou dois anos, sem que chegasse a atingir seu objetivo. Dado seus feitos na navegação costeira, a atividade de navegação costeando o litoral recebeu o nome de cabotagem em sua homenagem (SANTOS, 2013).

O transporte de cabotagem é definido, segundo a legislação brasileira, como a "navegação realizada entre portos ou pontos do território nacional, utilizando a via marítima ou essa e as vias navegáveis interiores" (LEI Nº 9432/97).

Segundo Santos (2013), a navegação de cabotagem de carga geral no Brasil foi fortemente afetada por uma série de fatores na segunda metade do século XX: i) adoção de política de desenvolvimento voltada para a construção de estradas, o que por sua vez fortaleceu o setor de transporte rodoviário; ii) a política populista de Vargas, Juscelino e Goulart, o que afetou as relações de trabalho e legislação, impactando os portos nacionais; iii) o protecionismo da marinha mercante, resultando numa frota incipiente, obsoleta e não competitiva; iv) a altíssima inflação dos anos 80 que se estendeu até o Plano Real, deteriorando rapidamente os preços de venda das mercadorias.

Quando comparada aos demais modos de transporte de cargas, algumas vantagens da cabotagem podem ser elencadas, como: maior eficiência energética, maior capacidade de transporte, maior vida útil da infraestrutura, maior vida útil dos equipamentos e veículos, maior segurança da carga, menor emissão de poluentes, menor número de acidentes, menor nível de avarias, menor custo operacional e menor impacto ambiental (CNT, Confederação Nacional dos Transportes, 2014). Por outro lado, a cabotagem normalmente apresenta tempo de trânsito mais elevado que o modal rodoviário. Além disso, requer um melhor planejamento por parte do embarcador, uma vez que os serviços são, na maioria das vezes, semanais e com datas determinadas para embarque. Comparado ao caminhão, que normalmente consolida cargas de tamanhos variados e de diversos embarcadores numa mesma viagem, outro ponto que pode gerar alguma desvantagem para a cabotagem é o fato de que um contêiner normalmente é

utilizado por apenas um embarcador, o que requer um lote maior de mercadoria para ser embarcada de cada vez.

O mercado de transporte marítimo utiliza como forma de unitização da carga o contêiner. Esse equipamento possui dimensões padronizadas em medidas inglesas (pés), sendo o TEU (*twenty feet equivalent unit*, em inglês), a unidade base de equivalência entre os diferentes tamanhos de contêineres. Existem diversos tipos de contêineres para transporte marítimo: de carga seca, refrigeradas, líquidos, gases e também para cargas de peso e dimensões especiais. Os contêineres são normalmente transportados em navios de carga geral ou porta-contêineres e, esses equipamentos, são usualmente de propriedade da empresa de navegação.

Figura 2.3 - Exemplo de contêiner de 45 pés

A Figura 2.3 apresenta um modelo de contêiner de 45 pés, muito utilizado principalmente na Ásia. No Brasil é pouco comum encontrarmos esse tipo de contêiner devido ao tipo de carreta chassi que utilizamos, o que limita o espaço entre a cabine do cavalo-mecânico e o contêiner. A Figura 2.4 traz informações sobre os diversos tipos de equipamentos disponíveis para o transporte marítimo, sendo o modelo “*dry box*” o mais utilizado para o transporte de cargas gerais no Brasil, e também no mundo.

<div> </div>		
20 Pés	Medidas	40 Pés
5,906	L – Comprimento (metros)	12,030
2,352	W – Largura (metros)	2,347
2,396	H – Altura (metros)	2,393
2.240	Tara (kg)	3.730
21.760	Carga (kg)	26.750

<div> </div>		
20 Pés	Medidas	40 Pés
5,929	L – Comprimento (metros)	12,072
2,287	W – Largura (metros)	2,286
2,261	H – Altura (metros)	1,878
2.600	Tara (kg)	4.995
27.400	Carga (kg)	30.567

<div> </div>		
20 Pés	Medidas	40 Pés
6,058	L – Comprimento (metros)	12,180
2,438	W – Largura (metros)	2,430
2,591	H – Altura (metros)	2,647

<div> </div>	
Medidas	20 Pés
L – Comprimento (metros)	5,886
W – Largura (metros)	2,332
H – Altura (metros)	2,338
Tara (kg)	2.240
Carga (kg)	21.760

<div> </div>		
20 Pés	Medidas	40 Pés
5,558	L – Comprimento (metros)	11,580
2,300	W – Largura (metros)	2,288
2,345	H – Altura (metros)	2,249
3.000	Tara (kg)	3.810
27.400	Carga (kg)	26.760

<div> </div>		
20 Pés	Medidas	40 Pés
5,898	L – Comprimento (metros)	12,040
2,333	W – Largura (metros)	2,320
2,348	H – Altura (metros)	2,290
2.020	Tara (kg)	3.980
21.980	Carga (kg)	26.500

<div> </div>	
Medidas	20 Pés
L – Comprimento (metros)	6,055
W – Largura (metros)	2,435
H – Altura (metros)	0,335

<div> </div>	
Medidas	40 Pés
L – Comprimento (metros)	12,033
W – Largura (metros)	2,352
H – Altura (metros)	2,698
Tara (kg)	3.800
Carga (kg)	26.680

Figura 2.4 - Modelos e dimensões de contêineres

Existem diversas empresas operando o serviço de cabotagem entre os portos ao longo da costa brasileira. Segundo a Associação Brasileira dos Armadores de Cabotagem (ABAC, 2014) ao menos 10 empresas oferecem serviço de cabotagem, tanto para o transporte de contêineres quanto para graneis líquidos e sólidos, o que exclui o maior operador que é a Transpetro, subsidiária da Petrobras.

A ANTAQ (2012) realizou uma análise da frota brasileira na navegação de cabotagem, onde mensurou a capacidade de transporte da frota brasileira, por operadora e por tipo de embarcação, em TPB - Tonelagem de Porte Bruto, utilizando os dados da frota em operação em 31 de dezembro de 2011. Com base nessa análise, apurou-se que a frota brasileira tinha 156 embarcações, operadas por 31 empresas, com portes muito variados. A frota possuía um TPB de 2.992.787 toneladas e a idade média da frota é de 17,4 anos, conforme Tabela 2.1. Apenas para comparar o quão pequena é a frota mercante brasileira perante um outro país de dimensão continental, a China possui 3.653 embarcações, sendo 297 navios para transporte de contêineres (CCS, 2017).

Tabela 2.1 - TPB total e número de embarcações com bandeira brasileira

Empresa Operadora	TPB (t)	% TPB	TPB Acumulado (t)	# Navios
Petrobras	1.383.838	46,24	46,24	42
Cia de Navegação Norsul	369.153	12,33	58,57	26
Empresa de Navegação Elcano	325.092	10,86	69,44	11
Aliança Navegação e Logística	283.582	9,48	78,91	10
Log-in Logística Intermodal	134.961	4,51	83,42	5
H. Dantas Com., Navegação e Indústria	110.732	3,70	87,12	4
Mercosul Line Navegação e Logística	105.662	3,53	90,65	3
Outros	279.767	9,35	100	55
Total	2.992.787	100	100	156

Fonte: ANTAQ (2012)

Apesar da reconhecida vantagem em termos de emissões de CO₂ que o transporte marítimo apresenta em relação ao rodoviário, Hjelle e Fridell (2012) ressaltam que as emissões calculadas pelo consumo de combustível e a capacidade bruta total em rotas de distância similar são muito eficientes para transporte de carga a granel. Para os casos de transporte de carga em contêineres ou Ro-Ro (*Roll-on Roll-off*), o fator real de utilização é muito relevante e deve ser considerado.

No caso dos operadores brasileiros de cabotagem em contêineres, além da atividade de transporte intermodal de contêineres entre um porto e outro, onde o embarcador gerencia os trechos rodoviários, essas empresas oferecem também uma solução multimodal, porta-a-porta, conforme Figura 2.5. Essa solução compreende a oferta de serviço de coleta e entrega, utilizando o transporte rodoviário próprio ou subcontratado, para retirar o contêiner carregado do seu local de origem (armazém ou fábrica) e levá-lo até o porto de embarque. Da mesma forma, inclui o transporte do contêiner do porto de destino até o recebedor final da carga, podendo ser um novo armazém, fábrica ou até mesmo uma loja. Através da oferta desse serviço multimodal, os operadores de cabotagem têm conseguido êxito no processo de convencimento dos embarcadores para experimentar o modal cabotagem porta-a-porta, pois simplificam a gestão logística para os embarcadores ao emitirem um conhecimento de transporte único e se responsabilizarem pela carga durante todo o processo de transporte. Alguns embarcadores, no entanto, preferem continuar contratando e fazendo a gestão dos trechos rodoviários, principalmente quando conseguem combinar seu fluxo de transporte de contêineres de cabotagem com os contêineres de importação ou exportação. Dessa forma, ao gerenciarem os trechos rodoviários, conseguem economizar utilizando um mesmo caminhão para transportar um contêiner cheio, por exemplo uma importação, com o transporte de um contêiner de cabotagem que é levado até o porto. Outras razões para continuarem utilizando apenas a solução intermodal incluem: negociações diretas com transportadores rodoviários em condições especiais, frota própria e baixa confiança de que o operador de cabotagem é capaz de prestar um serviço porta-a-porta com qualidade.

CABOTAGEM

Figura 2.5 - Etapas da cabotagem porta-a-porta

Fonte: Elaborado pelo autor

O transporte aquaviário brasileiro continua estagnado na casa dos 14% do total das cargas transportadas no país, sendo que somente 2% correspondem à carga geral containerizada. A diferença é relativa aos granéis sólidos e líquidos, ou seja: minérios e combustíveis, respectivamente. O modal rodoviário continua liderando o mercado das cargas com quase 60% (ANTAQ, 2014), o que traz diversas implicações, não apenas ambientais, mas também econômicas. Problemas relacionados a greves, acidentes, paralisações e constante necessidade de investimento na ampliação e recuperação da malha rodoviária acabam afetando o custo logístico brasileiro.

2.2.2 Rodo-fluvial

O Brasil possui um imenso potencial para utilização da navegação fluvial, com 63.000 km de rios e lagos, distribuídos em todo o território nacional, sendo mais de 40.000 km potencialmente navegáveis (MT, 2010). No entanto, a navegação comercial ocorre em pouco mais de 13.000 km, havendo grande concentração na Amazônia, devido as boas condições dos rios e as limitadas opções de transporte terrestre (MT, 2010).

Conhecido em algumas regiões do país como o sistema caboclo, operando com balsas e empurradores, o transporte fluvial é ainda bastante incipiente no Brasil. Segundo estimativas da ANTAQ, o transporte por hidrovias representa apenas 4% na atual matriz de transporte, comparada aos 58% do transporte rodoviário (MT, 2010).

Em relação às emissões de GEE, o transporte hidroviário apresenta uma maior eficiência energética, menor consumo de combustível, menores quantidades de emissões e maiores ganhos ambientais. De forma geral, o modal hidroviário apresenta um consumo de combustível 19 vezes menor e emite 6 vezes menos CO₂ para cada unidade de carga transportada quando comparado ao modal rodoviário (MT, 2010).

No caso de Manaus, a solução rodo-fluvial é uma das poucas alternativas disponíveis para o trânsito de mercadorias e passageiros entre essa região e o restante do país. Diversas empresas operam e oferecem serviço rodo-fluvial, tendo como alternativas as rotas via Belém ou Porto Velho. Considerando que a rota via Belém concentra a maior participação no volume total transportado nesse modo de transporte, vai receber maior atenção no detalhamento dessa solução.

A grande maioria das empresas que operam o serviço rodo-fluvial possuem carretas baú de aproximadamente 100 m³ de capacidade de carga ou 27 toneladas de capacidade em peso. Existem dois principais tipos de carga embarcados na origem. Aquelas que são chamadas de carga lotação (*FTL - Full Truck Load*, em inglês), onde todo o volume carregado num determinado veículo é originado de um único embarcador e é entregue para um único destinatário. As cargas conhecidas como cargas fracionadas (*LTL - Less than Truck Load*, em inglês), são aquelas que são consolidadas em um único veículo, mas que normalmente são originadas de diversos embarcadores podendo ser também direcionadas para um ou diversos destinatários.

Tomando-se o exemplo de uma carga lotação partindo de Manaus, elas são carregadas em carretas-baú que são tracionadas por cavalos mecânicos até o porto rodo-fluvial onde ficam aguardando o momento do embarque na balsa. Os cavalos mecânicos, após desconectarem-se das carretas, retornam ao pátio da empresa transportadora ou seguem para algum cliente embarcador para dar prosseguimento a novas transferências de carga para o porto.

As carretas-baú aguardam o embarque na próxima balsa disponível, o que pode ser quase de imediato ou em determinadas situações, como momento de pico de carga, podem aguardar por muitos dias. Quando do momento do embarque, um outro cavalo mecânico é engatado e faz a manobra da carreta-baú até a balsa. Ao chegar ao porto de Belém, as carretas-baú são movimentadas ao pátio de espera até que um novo cavalo mecânico seja contratado para transportá-las até o destino final. A Figura 2.6 demonstra o fluxo e as etapas envolvidas no transporte rodo-fluvial.

Figura 2.6 – Etapas do transporte rodo-fluvial

Fonte: Elaborado pelo autor

2.2.3 Rodoviário

Segundo o Anuário CNT do Transporte (CNT, 2018), existem no Brasil aproximadamente 454.000 cavalos mecânicos ou tratores, e pouco mais de 586.000 semirreboques ou carretas. A malha rodoviária no país é formada por mais de 1.720.000 km de vias, sendo pouco mais de 210.000 km pavimentadas, o que representa apenas 12% do total. As vias pavimentadas estão distribuídas da seguinte forma: 10,5% localizadas na região Norte, 28,1% na Região Nordeste, 29,3% na região Sudeste, 18% na região Sul e 14,1% na região Centro-Oeste (CNT, 2018)

O anuário também apresenta o número de empresas operadoras no transporte de cargas, que correspondem a mais de 147.000 empresas. Além das empresas, existem 332 cooperativas e 492.408 autônomos operando o transporte de cargas no Brasil (CNT, 2018).

Do total de 210.000 km de malha rodoviária pavimentada, apenas 22.388 km estão na Região Norte do país (Figura 2.7), e destes, apenas 2.157 km estão localizados no Estado do Amazonas (CNT, 2018).

Figura 2.7 – Malha rodoviária pavimentada por Região – em km

Fonte: Elaborado com base no Anuário CNT de Transporte (2018)

2.3 As mudanças climáticas e os gases de efeito estufa

Desde 1992, quando foi realizada no Rio de Janeiro a Conferência das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento e Meio-Ambiente, muito trabalho e esforço tem sido dedicado a encontrar maneiras de reduzir o impacto das emissões de GEE nas mudanças climáticas. Nesse encontro, ratificado por 154 países, foi dado início ao processo de acordo sobre limites de emissões. A primeira Conferência das Partes (COP1) foi realizada em 2005 na cidade Berlin, Alemanha, e foi o ponto de partida para início das definições das metas de cada país. No entanto, somente em 1997 (COP3), através do chamado Protocolo de Kyoto, foram estabelecidas metas de redução para emissão de GEE no período entre 2008 a 2012, em relação aos níveis de 1990. Durante a Conferência das Partes (COP17), realizada em 2011 na cidade de Durban – África do Sul, o prazo de validade do tratado foi prorrogado até no mínimo 2017.

Ao longo dos mais de 25 anos ocorreram diversos encontros e o mais recente deles, a COP23 foi realizado em Bonn, Ilhas Fiji, em maio de 2018. A próxima reunião (COP24) será realizada na cidade de Katowice, Polônia, e tem por objetivo garantir que os progressos alcançados, principalmente durante a COP21, conhecido como o Acordo de Paris, sejam mantidos e implementados pelos países membros.

O Protocolo de Kyoto divide os GEE em diretos e indiretos. Os seis gases regulados pelo Protocolo de Kyoto considerados como GEE diretos, também conhecidos como Gases de Kyoto, são:

- O dióxido de carbono (CO_2)
- O gás metano (CH_4)
- O óxido nitroso (N_2O)
- O hexafluoreto de enxofre (SF_6)
- Os hidrofluorcarbonos (HFCs)
- Os perfluocarbonos (PFCs)

Os GEE indiretos são:

- O dióxido de enxofre (SO_2)
- O monóxido de carbono (CO)
- Os óxidos de nitrogênio (NO_x)
- Os compostos orgânicos voláteis não-metânicos (COVNM)

Os GEE indiretos contribuem para o aquecimento global através da produção de gases de efeito estufa pela reação com outros compostos químicos (BOUZAS, 2016).

Conforme mencionado no capítulo introdutório, o dióxido de carbono (CO_2) é emitido principalmente durante o uso de combustíveis fósseis, representando em torno de 80% das emissões de GEE (LIAO; TSENG; LU, 2009). A importância do

CO₂ na emissão de GEE e, conseqüentemente, no aquecimento global, é também ressaltada por Cisneros e Brinati (2009).

O Ministério do Meio-Ambiente, (MMA, 2014) destaca quatro dos gases de Kyoto como sendo os principais na emissão de GEE: o dióxido de carbono (CO₂), o gás metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O) e o hexafluoreto de enxofre (SF₆). O dióxido de carbono (CO₂) é o mais abundante dos GEE, sendo emitido através de inúmeras atividades humanas, como por exemplo, por meio do uso de combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural) e também com a mudança no uso da terra. O CO₂ é utilizado como referência para classificar o poder de aquecimento global dos demais gases de efeito estufa. O gás metano (CH₄) é produzido pela decomposição da matéria orgânica, sendo encontrado geralmente em aterros sanitários, lixões e reservatórios de hidrelétricas e também pela criação de gado e cultivo de arroz. Tem poder de aquecimento global 21 vezes maior que o dióxido de carbono. O óxido nitroso (N₂O) resulta, principalmente, do tratamento de dejetos animais, do uso de fertilizantes, da queima de combustíveis fósseis e de alguns processos industriais, e possui um poder de aquecimento global 310 vezes maior que o CO₂. O hexafluoreto de enxofre (SF₆) é utilizado principalmente como isolante térmico e condutor de calor; é o gás com o maior poder de aquecimento sendo 23.900 vezes mais ativo no efeito estufa do que o CO₂.

Segundo Craig (2012), as políticas atuais para combater as mudanças climáticas têm colocado maior foco nos produtores das emissões de GEE. Fazem parte dessas políticas o Protocolo de Kyoto, em nível nacional, e o Projeto de Divulgação de Carbono (*CDP - Carbon Disclosure Project*, em inglês), em nível corporativo, dentre outros. No entanto, o Relatório de Desenvolvimento Humano 2011, do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (UNDP, 2011), ressalta o impacto que o aumento do consumo tem gerado sobre o meio-ambiente. Dessa forma, *"a melhoria da eficiência de carbono na cadeia de suprimentos (Supply Chain, em inglês) que produz os produtos e serviços torna-se um aspecto chave para redução dos impactos nas mudanças climáticas"* (CRAIG, 2012). O foco nos geradores das emissões resultou na criação de padrões de medição baseados em limites nacionais ou corporativos, em nível de emissões absolutas e não

baseado em eficiência. A melhoria da eficiência é um ponto chave no combate as mudanças climáticas, uma vez que num futuro próximo, melhor eficiência e conservação devem apresentar os maiores potenciais para redução nas emissões de carbono (CRAIG, 2012 *apud* PACALA E SOCOLOW, 2004). O nível de emissões de dióxido de carbono (CO₂) gerado pelos combustíveis fósseis está aproximadamente 50% mais elevado que em 1990 e, a produção e transporte de produtos gera aproximadamente 45% dessas emissões (IPCC, 2007).

A busca pela redução nas emissões de GEE tem utilizado um princípio chave em gestão operacional, a saber: "*medição leva à melhoria*" (PLAMBECK, 2012). Com base nesse conceito, o ponto de partida para a tomada de ações de redução de GEE é um inventário de gases de efeito estufa.

Em nível nacional, o Protocolo de Kyoto é o principal acordo cujo propósito é minimizar as emissões e os impactos nas mudanças climáticas. O acordo define que certos países industrializados devem medir suas emissões de GEE com base nas diretrizes de contabilização do IPCC (2006) durante certo período de tempo. O Painel Intergovernamental de Mudança Climática - IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, em inglês) publicou em 2006 as "Diretrizes para Inventários de emissões de Gases de Efeito Estufa" e esse documento define um mecanismo de conversão que permite a medição em um padrão único de quanto aquecimento global seria causado através da emissão de certa quantidade e tipo de gás de efeito estufa. A medição padrão é feita em termos de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}), representando a massa equivalente de CO₂ necessária para produzir o mesmo efeito no aquecimento global (CRAIG, 2012). O IPCC (2006) definiu o mecanismo de conversão baseado no potencial de aquecimento global (*GWP - Global Warming Potencial*, em inglês) e especifica o montante de aquecimento gerado por determinado gás em relação ao dióxido de carbono (CO₂). A metodologia apresentada pelo IPCC está dividida em 3 etapas de apuração, chamados de *Tier 1*, 2 e 3. O *Tier 1* é o mais simples e trabalha apenas com dados agregados de consumo de combustível multiplicado por um determinado fator de emissão. O *Tier 2* utiliza também o consumo de combustível e o respectivo fator de emissão, mas busca ser mais preciso ao utilizar dados específicos de um

determinado tipo de embarcação. O mais complexo é o *Tier 3* que utiliza para cálculo das emissões dados de potência e utilização das embarcações.

Através dessa metodologia definida pelo IPCC, os países conseguem preparar seu inventário de GEE e monitorar seu progresso em relação às metas definidas no Protocolo de Kyoto.

Também como mencionado no capítulo 1, o Brasil instituiu em 2009 a Política Nacional sobre a Mudança do Clima (PNMC) através da Lei Nº 12.187/09, com o compromisso voluntário junto à Convenção-Quadro da ONU sobre Mudança do Clima (UNFCCC, em inglês) de redução de emissões de gases de efeito estufa. O Decreto Nº 7.390/10 definiu as metas de redução entre 36,1% e 38,9% das emissões projetadas até 2020, tomando ações para redução da poluição atmosférica nos setores de uso da terra, energia, agropecuária e processos industriais. Para auxiliar no alcance das metas de redução, a lei estabelece ainda o desenvolvimento de planos setoriais de mitigação e adaptação nos âmbitos local, regional e nacional (MMA, 2014). Observando-se a evolução das emissões para cada setor ao longo dos últimos anos, torna-se ainda mais evidente a importância e a necessidade de ações de mitigação das emissões geradas pelo setor de energia, conforme podemos observar na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Emissões brasileiras em CO₂ eq por setor - em Gg

Setores	1990	2000	2005	2011	2012	Variação	Variação
						1990- 2005	2005- 2012
Energia	187.739	298.611	328.377	407.544	446.154	44,3%	35,9%
Processos Industriais	52.537	71.674	77.943	86.173	85.365	23,6%	9,5%
Agropecuária	303.772	347.882	415.724	449.853	446.445	23,8%	7,4%
Florestas	815.965	1.343.136	1.179.067	310.486	175.685	-39,2%	-85,1%
Resíduos	29.061	38.517	41.887	48.139	49.775	24,4%	18,8%
Total	1.389.074	2.099.820	2.042.998	1.302.195	1.203.424	-21,4%	-41,1%

Fonte: MMA (2017)

Gg = milhares de toneladas

Considerando a importância que o aumento das concentrações atmosféricas de GEE tem sobre as alterações climáticas, alguns governos estaduais e municipais têm se empenhado em fazer estimativas das emissões dos GEE visando a adoção de medidas para reduzir essas emissões. Um exemplo é o Estado de São Paulo, que instituiu a Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC) em 09 de novembro de 2009, através da Lei Estadual 13.978/09 e regulamentada pelo Decreto 55.947/10. O Governo Paulista disponibilizou para consulta pública em 2011 seu 1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos para o período de 1990 a 2008. Nesse inventário, que também seguiu as diretrizes do IPCC, além dos gases contemplados pelo Protocolo de Kyoto, também foram consideradas as emissões dos GEE indiretos: óxido de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO) e os compostos orgânicos voláteis (VOC). Também foram estimadas as emissões dos clorofluorcarbonos (CFC) e os hidroclorofluorcarbonos (HCFC), que além de contribuírem para o aquecimento global, também destroem a camada de ozônio (CETESB; Alves; Gonzalez, 2011).

Os inventários no âmbito corporativo também seguem as diretrizes do IPCC. O Protocolo GEE (*GHG Protocol, Greenhouse Gas Protocol*, em inglês) é apresentado em seu próprio website como "*a ferramenta de contabilização mais utilizada por governos e companhias líderes para entender, quantificar e gerenciar as emissões de GEE*", e oferece um modelo contábil para diversos padrões de GEE mundialmente (WBCSD; WRI, 2014). O protocolo estabelece três níveis de apuração do inventário, os chamados Escopos 1, 2 e 3 conforme Figura 2.8. Os Escopos 1 e 2 fazem parte do Padrão Corporativo (*Corporate Standards*, em inglês) e o Escopo 3 é parte do Padrão de Valor da Cadeia Corporativa (*Corporate Value Chain -Scope 3- Standard*, em inglês). O Escopo 1 inclui as emissões diretas de recursos possuídos ou controlados pela companhia. As emissões indiretas produzidas pela geração de energia adquirida estão relacionadas ao Escopo 2. O Escopo 3 consiste de todas as outras emissões indiretas (*GHG PROTOCOL*, 2000). O Protocolo GEE foi elaborado através de trabalho conjunto entre o Instituto de Recursos Mundiais (*WRI - World Resource Institute*, em inglês) e o Conselho

Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (*WBCSD - World Business Council for Sustainable Development*, em inglês).

Figura 2.8 – Visão geral dos âmbitos e emissões ao longo de uma cadeia de valor

Fonte: GHG Protocol Web Site (2014)

Outro padrão disponível, também alinhado com as diretrizes do IPCC, e utilizado por algumas organizações é a Especificação Disponível Publicamente (*PAS - Publicly Available Specification*, em inglês) 2050, elaborada pela Instituição Britânica de Padrões (*BSI - British Standards Institution*, em inglês). Consiste num método para calcular as emissões de GEE de produtos e serviços durante o seu ciclo de vida (BSI, 2011).

Craig (2012), ao comparar os dois padrões, descreve a necessidade de reportar ou tornar público os resultados do inventário como uma das principais diferenças. O Protocolo GEE exige o compartilhamento dos resultados, enquanto o PAS 2050 não exige que os dados sejam reportados, mas apenas guardados para que possam ser verificados, caso necessário.

2.4 Metodologia para cálculo das emissões

Uma questão chave para a busca de meios para a redução nas emissões de GEE é a elaboração de um inventário de emissões, o que requer uma

metodologia para estimar o consumo de combustível e as emissões de gases (EYRING; ISAKSEN; BERNTSEN, 2010).

As principais abordagens existentes para elaboração de inventários são conhecidas como: de cima para baixo (*top-down*, em inglês) ou de baixo para cima (*bottom-up*, em inglês). A abordagem *top-down* é mais genérica, e geralmente, utiliza dados globais para estimar as emissões. Já a abordagem *bottom-up* é usualmente utilizada para estimar as emissões de forma mais específica, ou até mesmo, de um determinado ambiente geográfico (MIOLA et al., 2010).

Existem dois principais métodos de cálculo das emissões, conhecidos como método baseado na atividade (*Activity-based approach*, em inglês) e o método baseado na energia (*Energy-based approach*, em inglês) (EUROPEAN CHEMICAL INDUSTRY COUNCIL, 2011).

O texto que é apresentado a seguir neste capítulo está dividido em duas partes: a primeira traz uma revisão da literatura sobre as diferentes abordagens utilizadas para cálculo das emissões, tendo maior ênfase nas emissões geradas pelo modal marítimo; na segunda parte, uma análise mais detalhada da bibliografia nos ajudará a identificar qual o melhor método de cálculo e determinar o fator de emissão a ser utilizado para estimar as emissões de CO₂, tanto no modal marítimo quanto no modal rodoviário.

2.4.1 Abordagens de cálculo das emissões

A maior parte da literatura que trata das emissões marítimas de GEE coloca um foco maior na forma de alocação geográfica das emissões, seja em nível global ou regional (DE MEYER; MAES; VOLCKAERT, 2008). A preocupação em alocar as emissões está diretamente relacionada ao acordo firmado no Protocolo de Kyoto, onde os países são responsáveis pela redução das emissões, segundo o inventário de cada país. A complexidade em alocar as emissões fez com que o transporte marítimo internacional ficasse fora das metas estabelecidas para cada país no Protocolo de Kyoto (HJELLE; FRIDELL, 2012).

Diversos estudos foram realizados pela comunidade acadêmica para calcular as emissões geradas pela navegação, utilizando para análise as abordagens *top-down* e *bottom-up*, e suas derivações, levando em consideração a caracterização e localização geográfica das emissões. As características de cada tipo de metodologia utilizada e as fontes de dados são determinantes para estabelecer o nível de precisão dos resultados. As variações em relação ao período considerado, tipo de embarcação e origem das emissões fazem com que a comparação entre os fatores emissores seja complexa.

Segundo Eyring *et al.* (2010), numa abordagem *top-down*, as emissões são calculadas considerando a quantidade de consumo total de combustível por tipo, multiplicado pelo fator de emissão. As emissões apuradas são distribuídas mundialmente através da participação espacial. Também identifica dois tipos diferentes de abordagem *top-down*: uma que usa o total mundial de venda de combustível, através da soma por país; a segunda abordagem utiliza os dados de consumo da frota em atividade em determinado período.

No caso da abordagem *bottom-up* as emissões são estimadas considerando o contexto específico que resultam em um inventário de emissões para este determinado ambiente geográfico, com base nas atividades desse local (EYRING; ISAKSEN; BERNTSEN, 2010). A abordagem se identifica no conceito de sustentabilidade e na precisão tecnológica para medir o consumo das fontes geradoras. As características consideradas podem ser relacionadas à questões de navegabilidade, características dos portos e dos canais de acesso, diferentes tipos de embarcações, tamanhos, capacidades, motores principais e auxiliares e tipos de combustíveis utilizados (MIOLA; CIUFFO, 2011).

Embora a abordagem *bottom-up* possa ser mais precisa, no sentido de acuracidade, inventários em longa escala utilizando essa abordagem também podem ser imprecisos, uma vez que variáveis como desempenho do motor, velocidade e rota para alocação das emissões são estimadas (EYRING; ISAKSEN; BERNTSEN, 2010).

Para caracterizar e classificar as possíveis combinações de metodologias de análise das abordagens que estimam as emissões no modal marítimo, o relatório do IPCC utiliza a classificação indicada por Miola *et al.*, (2010) e, Miola e Ciuffo, (2011) em que as abordagens podem ser classificadas como:

- a) abordagem 100% *top-down*;
- b) *bottom-up* para avaliação de emissões seguido da abordagem *top-down* para caracterização geográfica;
- c) *top-down* para emissões totais seguido da abordagem *bottom-up* para caracterização geográfica;
- d) abordagem 100% *bottom-up*.

2.4.1.1 Abordagem 100% top-down

A abordagem 100% *top-down* foi aplicada por Corbett, Fischbeck e Pandis (1999), Corbett, Wang e Winebrake (2009), e Endresen *et al.*, (2007). Essa abordagem calcula as emissões sem considerar as características tecnológicas de cada navio, utilizando os dados estatísticos de consumo de combustíveis disponibilizado pela Administração de Informações de Energia (*EIA - Energy Information Administration*, em inglês). A estimativa de emissões globais é baseada no total de combustível consumido aplicando-se diferentes fatores de emissão para cada tipo de combustível (MIOLA; CIUFFO, 2011).

2.4.1.2 Bottom-up para avaliação de emissões, seguido da abordagem Top-down para caracterização geográfica

Endresen e Sørge (2003), Endresen *et al.* (2005, 2007), Corbett e Koehler (2004), Eyring *et al.*, (2005), aplicaram metodologias similares entre si, considerando as emissões das atividades marítimas por navio e utilizando como base de dados estatísticas de emissões da frota mundial de navios da *Lloyd's Register of Shipping*. As emissões foram calculadas utilizando dados de consumo de combustíveis para cada categoria de navio (potência do motor) e, assumindo

como premissas a potência média dos motores e a quantidade média anual de horas em operação.

Dalsoren *et al.*, (2008) estudaram as emissões considerando o tamanho, o tipo das embarcações em mar e em operações em portos. Utilizaram como base de dados o *Lloyds Register* (2005) e os dados de potência dos motores principais e auxiliares são fornecidos pela *Lloyds Register Fairplay* (2005), sendo utilizados dados de 32.000 embarcações e analisando grupos de perfis de atividade. O perfil de operação foi obtido pelo LMIU (2004) e os fatores de emissão foram utilizados dados fornecidos por Cooper (2003). As emissões em mar foram distribuídas espacialmente utilizando observações das bases AMVER e COADS.

O modelo de emissões da frota considera a quantidade de poluentes emitidos por tipo de poluente e em cada frota, considerando o modo de operação (em mar ou em porto), tipo de embarcação, tipo de motor (principal ou auxiliar), os fatores de emissão de cada poluente por tipo de motor. O cálculo das emissões em porto considerou o modo de operação de manobras e carregamento/descarregamento.

Tzannatos (2010) analisou as emissões derivadas de atividades operacionais de manobra e atracação (*manouvering e berthing*, em inglês) do porto de Pireus, localizado na península grega, durante um período de doze meses (06/2008 a maio/2009). O porto atendia em torno de 20 milhões de passageiros anualmente. As estimativas de emissões consideraram as principais embarcações e foram analisadas as emissões dos poluentes NO_x, SO₂, PM_{2.5}, considerando os tipos de gases, sazonalidade e tipo de operação.

Para calcular as emissões em cada operação (*manouvering e berthing*) no porto, no estudo foram considerados os fatores de emissões em atividades particulares das embarcações, ou seja, os perfis de emissões para embarcações em portos consideram os tipos de motor (principal ou auxiliar), fatores de emissão para cada motor, tamanho, capacidade, tipo de combustível utilizado, tempo despendido em cada operação. As emissões foram agrupadas por períodos

sazonais (inverno, primavera, verão e outono) e os dados sobre movimentação dos navios foram obtidos do MMM (*Ministry of Mercantile Marine*) e PPA (*Piraeus Port Authority*). Dados sobre as embarcações foram obtidos da LRS.

2.4.1.3 Top-down para emissões totais seguido da abordagem Bottom-up para caracterização geográfica

Wang e Corbett (2005) focalizaram o estudo em aplicações de sistemas de informações geográficas para melhor informar e auxiliar em políticas ambientais a partir de caracterização geográfica de tráfego e emissões. O estudo utiliza os dois primeiros módulos do CMV-TAEM (*Commercial Marine Vessel Traffic and Air Emissions Model*), abordando o tráfego de embarcações e as emissões. Para representar os nós e segmentos da rede de tráfego, foi utilizada a base de dados ICOADS (*International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set*), para identificar a localização das embarcações comerciais, e a rede informada por USACE (*U.S. Army Corps of Engineers*).

Com o método *top-down*, as emissões são atribuídas à malha geográfica de acordo com as observações do ICOADS (WANG; CORBETT, 2005). Para identificar as emissões na malha são consideradas as emissões na área estudada e a quantidade de observações na malha e na área. As emissões em cada rota são calculadas a partir de informações sobre a velocidade das embarcações, a potência dos motores principal e auxiliar, capacidade e os fatores de emissões de cada embarcação, em cada rota e em cada viagem.

De acordo com Wang e Corbett (2005) 84,5% da navegação comercial ocorreu ao norte do equador, sendo 10% apenas na costa dos Estados Unidos. A estimativa de emissão de dióxido de enxofre (SO₂) em 2002 foi em torno de 120.000 Mt, sendo 70.000 Mt emitido na costa da Califórnia. Os autores ressaltam a necessidade de fazer um estudo apurado sobre as características e atributos da frota ou por tipo de atividade.

2.4.1.4 Abordagem 100% Bottom-up

A metodologia *bottom-up* estima as emissões considerando-se o contexto espacial que resulta nos inventários de emissão. As emissões das embarcações e das rotas são calculadas baseadas na movimentação das embarcações, atributos (tipo de embarcação, tamanho, velocidade e potência do motor) e fatores de emissão e a localização das emissões é determinada considerando-se as rotas de navegação mais prováveis (PAXIAN et al., 2010).

Paxian *et al.*, (2010) apresentaram uma metodologia *bottom-up* para calcular o consumo de combustível, de emissões e densidade de tráfego para 2006 e dois cenários futuros em 2050. Utilizaram três bases de dados da LMIU (*Lloyd's Marine Intelligence Unit*), o primeiro se refere a informações de movimentação das embarcações, informam a “ship ID”, porto de origem e destino e datas de viagem. A base de dados das embarcações informa o nome das embarcações, tamanho, potência dos motores principais, velocidade média, bandeira e tipo de embarcação. A base de dados de portos informa os nomes e coordenadas geográficas. Características específicas das embarcações e dos motores foram obtidas por Wang, Corbett e Firestone (2007), dados de consumo e fatores de emissão de motores principais e auxiliares foram obtidos do estudo de Eyring *et al.*, (2005) e os fatores de emissão de CO₂ foram obtidos da Entec UK Limited (2005).

Os autores consideraram as embarcações maiores que 100 GT (*gross tonnage*) e que deixaram o porto nos meses de fevereiro, abril, junho, agosto, outubro e dezembro de 2006, concentrando-se na região Ártica. O cálculo de consumo de consumo foi separado por consumo dos motores principais, auxiliares e atividades portuárias. As concentrações geográficas de movimentações marítimas foram determinadas a cada quadrante de 0,5° x 0,5° do globo e obtidas de uma coleção de dados de ISLSCP (*International Satellite Land Surface Climatology Project Initiative*). Para tanto, utilizaram o algoritmo SeaKLIM, que busca a rota mais provável para cada combinação de origem e destino, calculando o menor caminho da malha considerando massas continentais, tamanhos dos canais de navegação e altura das ondas.

O consumo global de combustível foi de 221 Mt em 2006; o consumo de motores auxiliares e atividades portuárias corresponderam a 11% e 10% do consumo dos motores principais. No Ártico, o consumo da Groenlândia foi 1.60 Mt. Os autores identificaram que as regiões mais movimentadas conectam o Atlântico Norte, Pacífico Norte, Oceano Índico e a costa da Europa, Ásia e Golfo do México, enquanto as áreas polares indicam baixa atividade (PAXIAN *et al.*, 2010)

Georgakaki *et al.* (2005) analisaram a frota comercial da União Europeia de embarque e desembarque nos portos durante o ano de 1995 utilizando dados do projeto TRENDS (*Transport and Environment Database System*), sobre portos do MCA (*Maritime Coastal Area*) e das embarcações do LRS.

O método de cálculo consiste na divisão da frota em categorias, agregadas por similaridades operacionais, bens transportados, proporções físicas, maquinário auxiliar necessário e velocidade das embarcações. O projeto TRENDS assume que as embarcações abaixo de 2000 GT são de média velocidade, e acima de 2000 GT são de baixa velocidade. As emissões dos compostos NO_x, CO, HC, CO₂, SO₂ e PM foram calculadas para cada tipo de motor (*slow speed, medium speed e steam turbine*).

O cálculo do consumo de embarcações, em primeiro momento, analisa as relações do tipo de embarcação (*tanker, Bulk carrier, general cargo, container, RoRo/ferry/cargo, passenger ship*) com a taxa de consumo de combustível, chegando à média de consumo do porto de Helsinki. No estudo foi calculado somente o consumo das embarcações cargueiras, agrupando classes de consumo por faixa de peso e quantidade de embarcações, por porto de entrada e saída. Neste estudo de consumo não foram consideradas embarcações de passageiros. Para estimar as emissões em todos os portos, foram consideradas embarcações abaixo de 2000 GT, de cada tipo de embarcação, em que fatores de emissão são aplicados ao consumo de combustível. As estimativas indicaram a emissão de aproximadamente 1 MT de SO_x e 1,5 MT de NO_x entre os países da União Europeia.

Jalkanen *et al.* (2009) abordaram a utilização de informações de satélite (AIS) para caracterizar de forma individualizada as condições de navegabilidade (velocidade, posição, curso, origem, destino), considerando o efeito das ondas no consumo de combustível e nas emissões. O AIS (*Automatic Identification System*) foi utilizado para transmitir informações sobre a posição dos navios, para tanto nas embarcações haviam instaladas uma espécie de “*transponder*”, ferramenta que transmite as posições constantemente, utilizado inicialmente para reduzir as ocorrências de colisões entre grandes embarcações.

Estes dispositivos foram instalados a partir de 2004, com a regulação da IMO/SOLAS, que introduziu regulamentação definindo a instalação destes dispositivos para navios em viagens internacionais com capacidade acima de 300 GT, para navios com capacidade acima de 500 GT em trechos regionais (nacionais) e para todos os navios de passageiros independentemente do tamanho.

A facilidade de captação do sinal permitiu que entidades, grupos representativos e empresas privadas pudessem criar alternativas para captar os sinais e ampliar a difusão das informações, dentre estes grupos, os autores citam *Marinetraffic*, *Lloyd’s MIU AIS* e outros que propuseram cobertura regional e global.

A partir da comparação dos dados obtidos com outras fontes de dados, Jalkanen *et al.* (2009) concluíram que as bases de dados ICOADS e AMVER podem prover boas informações para dimensionar emissões marítimas globais. No entanto, o sistema AIS fornecia informações com maior acuracidade em regiões específicas. Os autores realizaram as estimativas de emissões cruzando as informações de atividades marítimas, obtidas através do AIS, com informações relativas ao consumo e emissões através do modelo STEAM (*Ship Traffic Emission Assessment Model*). Modelo que provê um espectro relativamente completo de informações, considerando-se a rota que o navio está regularmente servindo, informações sobre consumo e emissões de motor principal, potência dos motores e consumo específico de combustível, além de fornecer diferentemente de outras fontes, informações sobre estimativas de valores de emissões para NO_x, SO_x e PM.

Outra alternativa considerada por Jalkanen *et al.* (2009) foi a utilização dos fatores de emissão (g/kWh) associados à potência de motores, divulgados por IMO (2008), divididos em 3 grupos (motores abaixo de 133 kW, motores entre $130 < n < 2000$ kW e motores acima de 2000 kW). Ou seja, para reduzir as incertezas, consideraram a importância de individualizar as emissões até o menor nível possível (navio, tipo de motor, combustível utilizado).

Apesar da importância, os autores indicaram três restrições relativas à utilização do sistema AIS: i) a ainda baixa penetração do sistema AIS (navios que atuam exclusivamente na costa brasileira não possuem essa tecnologia instalada), ii) a dificuldade do sistema AIS de suportar estimativas de emissões em atividades de porto (espera, manobra e atracação). Além disso, um navio não existe até entrar no raio de recepção do satélite, isso significa que uma parcela importante da viagem pode não ter sido considerada por Jalkanen *et al.* (2009). iii) outro ponto importante são os intervalos de transmissão, embora proponha transmitir a cada 3 segundos, na prática esse tempo de transmissão pode ser maior (MIOLA *et al.*, 2010) e assim, perdendo informações importantes, relativas a momentos de aceleração/desaceleração. Concluíram ainda que, as informações de consumo de combustível fornecidas pelos armadores (*ship owners*) são fundamentais para melhorar a acuracidade das estimativas de emissão. As análises de medições diretas são necessárias, especialmente para navios construídos anteriormente à 2000.

As diferentes abordagens avaliadas apresentam, ao menos, um ponto em comum. Todas elas utilizam o consumo de combustível como sendo o principal dado, o que multiplicado pelo fator de emissão de cada respectivo tipo de combustível, permite o cálculo da estimativa de emissões.

A Tabela 2.3 apresenta um comparativo entre as abordagens *Top-down* e *Bottom-up*, onde fica bem destacado a diferença entre cada abordagem.

Tabela 2.3 - Comparativo entre as abordagens estudadas

Abordagem	Disponibilidade de dados de consumo	Acuracidade da estimativa	Aplicação
<i>Top-down</i>	Genéricos ou Globais	Menos precisa	Estimativas Globais
<i>Bottom-up</i>	Específicos	Mais precisa	Estimativas pontuais ou locais

Fonte: Elaborado com base na revisão bibliográfica

2.4.2 Modelos de cálculo

Considerando que tanto a abordagem *top-down* quanto a *bottom-up*, bem como as derivações das mesmas, podem ser utilizadas também para calcular as emissões de outros modais, inclusive o rodoviário, torna-se relevante identificar os modelos de emissão de CO₂ utilizados em diversos trabalhos acadêmicos. Através desse entendimento será possível escolher o método de cálculo e o fator de emissão mais adequado para cada modal de transporte.

Os dois métodos utilizados para o cálculo das emissões de CO₂ são: o Método baseado na atividade (*Activity-based approach*, em inglês) e o Método baseado na energia (*Energy-based approach*, em inglês). O método baseado na atividade é o mais recomendado quando a atividade ocorre fora do controle direto de quem está fazendo o cálculo das emissões (DE MEYER; MAES; VOLCKAERT, 2008); (SONG; XU, 2012). Como exemplo poderíamos citar uma indústria química que contrata seus fornecedores para transportar seus produtos de um ponto a outro e não possui acesso direto aos dados de consumo de combustível (EUROPEAN CHEMICAL INDUSTRY COUNCIL, 2011). Nesse caso, o método indicado é o baseado na atividade. A fórmula de cálculo das emissões para esse método é o seguinte:

Activity-based approach

$$E_{atividade} = V_{modal} * D_{modal} * F_e \quad (2.1)$$

Onde:

$E_{atividade}$ = Emissão de CO₂ para cada modal – em t

V_{modal} = Volume transportado por cada modal – em t

DM_{modal} = Distância média percorrida por cada modal – em km

F_e = Fator de emissão médio por t.km para cada modal - em t

O método baseado na energia ou combustível (*Energy-based* ou *Fuel-based approach*, em inglês) é mais simples e acurado, sendo recomendado principalmente para empresas de transporte que querem calcular as emissões geradas durante suas atividades (SCHROOTEN et al., 2009); (ENDRESEN et al., 2005). O acesso completo aos dados de consumo de combustível, multiplicado pelo fator de emissão do respectivo combustível, garante a simplicidade e acuracidade desse método. A fórmula aplicada nesse método é a seguinte:

Energy-based approach

$$E_{energia} = C_{modal} * F_e \quad (2.2)$$

Onde:

$E_{energia}$ = Emissão de CO₂ para cada modal - em t

C_{modal} = Consumo de combustível para cada modal – em l.

F_e = Fator de emissão para o tipo de combustível – fator por litro

Para ambos métodos de cálculo, o uso correto do fator de emissão é muito importante, apurando assim a quantidade correta de emissão de CO₂ (EUROPEAN CHEMICAL INDUSTRY COUNCIL, 2011).

Song *et al.* (2010) destacaram que a maior parte dos estudos que utilizam a metodologia baseada na atividade tomou por base dados agregados de diferentes tipos e tamanhos de navios. No entendimento dos autores, o transporte marítimo de contêineres poderia ser mais bem avaliado considerando os aspectos relacionados ao serviço desempenhado, dado que o transporte por contêiner é

mais padronizado e regular. Questões como o número de portos no serviço, tempo de espera para atracação, tempo de operação nos portos e o volume de carga transportado entre os diferentes portos poderia ser mais bem explorado e contribuiria para uma melhor estimativa dos níveis de emissões.

Dentro de uma rota de serviço, os navios carregam e descarregam carga, e também contêineres vazios. Dessa forma, o fator de carregamento ou utilização do navio varia de trecho para trecho, assim como a velocidade, que também é dependente do plano de viagem traçado (*Service Proforma*, em inglês). Por esse motivo é apropriado o cálculo do consumo de combustível e a emissão de CO₂ trecho por trecho e porto por porto (SONG, 2010).

Tabela 2.4 - Comparativo entre os métodos estudados

Método	Disponibilidade de Dados de Consumo	Acuracidade da Estimativa	Aplicação
<i>Activity-based approach</i>	Não disponíveis	Menos preciso	Atividades indiretas
<i>Energy-based approach</i>	Dados disponíveis	Maior precisão	Atividades diretas

Fonte: Elaborado com base na revisão bibliográfica

2.4.3 Emissões do modal aquaviário/marítimo e fluvial

Como o Dióxido de Carbono (CO₂) é o principal GEE emitido pelos diferentes modais de transporte, devido ao alto uso de combustíveis fósseis, e o benefício da redução dos demais gases é comparativamente muito menor (*IMO GHG Study*, 2009), a comparação entre os modais de transporte será realizada considerando apenas as emissões de CO₂.

O segundo estudo sobre emissões de gases de efeito estufa, elaborado pelo IMO em 2009 apresenta um comparativo de eficiência para os diferentes modais de transporte, tendo aplicado para cálculo os fatores de emissão segundo as diretrizes do IPCC (2006) e do UNECE/EMEP CORINAIR. Esse estudo utilizou fatores de emissão baseado no consumo de combustível (*Fuel-based emission*

factors, em inglês) para calcular as emissões, conforme Tabela 2.5. Nesse estudo foi utilizado o fator de emissão de 3.190 quilogramas de CO₂ para cada tonelada de combustível marítimo consumido. A multiplicação do total estimado de combustível pelo fator de emissão de CO₂ apresentado na Tabela 2.5 possibilitou a estimativa do total de emissões geradas por todo o transporte marítimo globalmente entre o período de 1990 e 2007, conforme Tabela 2.6.

Tabela 2.5 - Fatores de emissão utilizados no Inventário 2007 - IMO

		Fator de Emissão (kg/t)	Referência
CO ₂	Residual fuel oil	3.130	IPCC 2006
	Marine diesel oil	3.190	IPCC 2006

Fonte: Estudo IMO GHG (2009)

Tabela 2.6 - Emissões mundiais de CO₂ de transporte marítimo

Ano	CO ₂ (mt)
1990	562
1991	587
1992	598
1993	624
1994	644
1995	663
1996	679
1997	717
1998	709
1999	722
2000	778
2001	784
2002	794
2003	849
2004	907
2005	955
2006	1008
2007	1050

Fonte: Estudo IMO GHG (2009)

Segundo Eyring *et al.* (2010), diversos estudos calcularam as emissões globais utilizando uma abordagem *top-down* através da combinação de estimativas de venda de combustível com o respectivo fator de emissão. A empresa Entec UK *Limited* desenvolveu um inventário para a União Europeia em 2005 aplicando a metodologia *bottom-up*, onde a estimativa de emissões foi calculada utilizando os quilômetros navegados por cada navio e o fator de emissão ponderado para cada tipo de embarcação, ao invés de utilizar o fator de emissão baseado no combustível consumido.

Lee *et al.* (2010) desenvolveram um modelo com o objetivo de calcular o custo externo do transporte rodoviário e cabotagem (*Short Sea Shipping*, em inglês) em Taiwan. No seu modelo foi colocado foco apenas na poluição do ar e na mudança climática (CO₂), ignorando outros custos externos como ruídos, acidentes ou congestionamento. No caso de transporte rodoviário, ao calcular a poluição do ar, foi realizado o cálculo do volume de emissões para cada tipo de poluente, aplicando o fator de intensidade de atividade e o fator de emissão. Em seguida, o custo externo foi calculado multiplicando-se a poluição do ar emitida pelo custo de oportunidade (*avoidance cost*, em inglês). O cálculo de mudança climática focou principalmente no volume de CO₂ liberado na atmosfera e o custo externo foi estimado multiplicando o total de CO₂ emitido por um fator de custo. No cálculo da cabotagem, estudos anteriores indicaram que o custo externo mais significativo é a poluição do ar (LEE, 2010 apud ISAKSON *et al.*, 2001; (DENIZ; DURMUŞOĞLU, 2008). O fator de emissão depende do tipo de combustível, tipo de motor, consumo, tempo de viagem e modo de operação.

Os fatores de emissão utilizados para o cálculo do transporte rodoviário foram baseados na Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico, 1999 e 2003 (OCDE, em inglês). Para cálculo do transporte aquaviário os fatores de emissão utilizados basearam-se nos estudos de Endresen *et al.* (2003) e EMEP/Corinair (1999), estudos esses também utilizados por Deniz e Durmusoglu (2008).

Lee *et al.* (2010) concluíram em seu estudo, através da comparação das emissões de CO₂ para três corredores, que a modo cabotagem (SSS, *Short Sea Shipping*, em inglês) emitiria 8.699 toneladas versus 64.690 toneladas produzidas pelo transporte rodoviário, ou seja, a quantidade de CO₂ produzido por um caminhão seria 7.5 vezes o produzido por um navio carregando a mesma quantidade de carga para as mesmas rotas.

Outro estudo realizado também em Taiwan por Liao *et al.* (2009) comparou as emissões de CO₂ para o transporte das exportações e importações entre três portos e as regiões Norte, Centro e Sul do país, utilizando a intermodalidade (caminhão e navio) versus o transporte rodoviário apenas. Para o cálculo das emissões rodoviárias os autores utilizaram o fator de emissão de 155 g/t.Km conforme o estudo de Ierland *et al.* (2000). O fator de emissão do transporte marítimo seguiu as diretrizes do IPCC (1997). O resultado final mostrou um potencial de redução nas emissões de CO₂ de 60,3% ao utilizar a solução intermodal ao invés do transporte rodoviário.

Liao *et al.* (2009) também aplicaram um conceito utilizado por Corbett e Fischbeck (2000) para estimar o consumo por viagem entre portos. O tempo de viagem entre os portos é multiplicado pelo fator de consumo de combustível (t/h), assumindo um fator de utilização do navio.

Andrade *et al.* (2014) aplicaram a metodologia *bottom up* para calcular o potencial de redução de GEE através da intermodalidade no corredor de carga geral entre Manaus e Santos. O estudo utilizou a metodologia sugerida por Psaraftis e Kontovas (2008) para o cálculo das emissões aquaviárias e foi adaptada para simplificar o cálculo das emissões. O fator de emissão utilizado foi o indicado pelo IMO (2010). Para o cálculo da alternativa rodoviária, os autores aplicaram uma aproximação da abordagem *Tier 2* desenvolvida pelo IPCC (2006) e utilizaram os fatores de emissão para diesel sugeridos pelo Primeiro Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2011). A principal simplificação realizada pelos autores nesse estudo refere-se ao fato de os mesmos terem desconsiderado dos cálculos o trecho

fluvial. Para o cálculo das emissões do trecho aquaviário foi considerado apenas o trecho entre Macapá e Santos e para as emissões rodoviárias foi considerado o trecho entre Belém e Santos. Neste estudo também não foram considerados os trechos relativos à coleta e entrega das cargas, bem como as emissões geradas durante o processo de carregamento e descarregamento dos contêineres.

No estudo, os autores identificaram que, de acordo com Dong-Ping (2010) navios com tamanho entre 2000 - 4000 TEUs emitem 132,89 g/TEU.km e de acordo com DEFRA (s.d.) apud McKinnon e Percyk (s.d.) um navio de 2500 TEUs emite 13,5 g/t.km. Ao apurarem os resultados das emissões (Tabela 2.7), foi observado que os mesmos apresentaram índices maiores que os valores internacionais, o que pode ser resultante do fato de que o estudo em questão utilizou dados de consumo baseados numa proforma, e não em dados reais. Além disso, algumas das suposições utilizadas bem como as características tecnológicas das embarcações, também poderiam explicar tal variação.

Tabela 2.7 - Índices comparativos das emissões de CO₂ por navio porta-contêiner para o trajeto entre os portos de Macapá e Santos

Unidade	Índice Médio
tCO ₂ /km	0,24
gCO ₂ /t.km	6,07
gCO ₂ /TEU.km	162,40

Fonte: Andrade *et al.* (2014)

A conclusão do estudo indica um alinhamento com a literatura internacional e constata que a cabotagem de fato apresenta menores níveis de emissão de GEE quando comparado ao modal rodoviário, ao apresentar menores índices de emissão por unidade transportada, conforme pode ser observado na tabela 2.8.

Tabela 2.8 -- Emissões de CO₂ comparativas dos modos rodoviário e de cabotagem

Modo de Transporte	Emissão total de CO ₂ (kg)	Emissão por unidade de distância (kg/km)	Emissão por unidade de carga e distância (g/t.km)
Rodoviária (Belém - Santos)	2.379	0,78	65,37
Cabotagem (Macapá - Santos)	2.067.094	235,07	6,07

Fonte: Andrade *et al.* (2014)

Hjelle and Fridell (2012) desenvolveram um estudo comparando as emissões de CO₂ da cabotagem (SSS), usando navios de diferentes tamanhos e tipos, com o modal rodoviário e ferroviário em operação na Europa. Nesse estudo, as emissões do modal cabotagem foram calculadas para navios de tamanhos específicos utilizando fatores de emissões do IMO (2009), tomando-se por base o DWT (*Dead Weight Tonnage*, em inglês) dos navios e aplicando-se um fator de ajuste com base no peso real faturado (*payload use*, em inglês) conforme Tabela 2.9. Os fatores de ajuste foram: 0.95 para navio tanque; 0.8 para contêiner e 0.5 para navio Ro-Ro (*Roll-on, Roll-off*, em inglês). Para cálculo das emissões do modal rodoviário os autores aplicaram os fatores de emissões do projeto Artemis, onde a emissão de CO₂ para um caminhão Euro 4, com capacidade para 26 toneladas de carga, viajando totalmente carregado varia entre 1380 g/km numa zona urbana e 1080 g/km, numa zona rural.

Tabela 2.9 - Emissões de CO₂ por tipo de veículo - em g/t.km

Tipo de Navio/Veículo	Total de CO ₂ (g/t.km)
Navio Tanque - DWT 120 a 200	4.4
Navio Contêiner - 1000 a 1999 TEU	32.1
Navio Contêiner - 0 a 999 TEU	36.3
Navio RO-RO - 2000+ Im	49.5
Rodoviário	150 (80-180)
Ferroviário	10-119

Fonte: Hjelle e Fridell (2012) baseado no IMO MEPC (2009)

O cálculo da emissão para navio contêiner demonstrado na tabela acima considera o peso de 7 toneladas por contêiner com uma taxa de utilização de 70% (*load factor*, em inglês).

Os autores concluíram que tanto o transporte de contêineres como os navios Ro-Ro, de fato, podem ser considerados como meios de transportes mais eficientes quando comparados a outros modais de transporte, principalmente em relação à emissão de CO₂.

O Programa de Monitoramento e Avaliação Europeu (EMEP) em conjunto com a Agência Europeia de Meio-Ambiente (EEA) têm publicado há alguns anos um manual para elaboração de inventário de emissões, conhecido anteriormente como *EMEP/Corinair Air Pollution Inventory Guidebook*. A versão publicada em 2013, chamada de *EMEP/EEA Air Pollution Inventory Guidebook*, traz claras instruções sobre como calcular as emissões, tendo capítulos específicos para cada modo de transporte. O manual traz também orientações sobre qual a melhor metodologia de cálculo segundo o nível de informações e dados disponíveis. Além disso, apresenta fatores de emissão para cada tipo de veículo e combustível. Importante ressaltar que o EMEP/EEA segue os padrões do IPCC 2006, buscando complementar as instruções para elaboração de inventários.

O manual apresenta uma metodologia por *Tiers* para cálculo das emissões do modal marítimo (Figura 2.9). À medida que a disponibilidade de informações detalhadas vai ficando mais restrita, o consumo de combustível passa a ser o fator mais preponderante para cálculo das emissões.

Figura 2.9 - Árvore de decisão para cálculo das emissões marítimas

Fonte: EMEP/EEA (2013)

Segundo especialistas, os fatores de emissões para combustíveis são geralmente bem estabelecidos, uma vez que são dependentes, principalmente, da quantidade de carbono presente no combustível (CORBETT; FISCHBECK, 2000).

A abordagem *Tier 1* é a mais simples e segue o mesmo padrão do IPCC. Através do levantamento da quantidade de combustível consumido, por tipo de combustível, multiplicado pelo fator de emissão respectivo, é possível estimar a quantidade de CO₂ emitida para aquela atividade.

A fórmula aplicada ao *Tier 1* é a seguinte:

$$E_{marítima} = \sum(CC_a * F_{ea}) \quad (2.3)$$

Onde:

$E_{marítima}$ = Emissões marítimas – em kg

CC = Combustível consumido – em kg

F_e = Fator de emissão do tipo de combustível– em g/kg

a = Tipo de combustível

Os fatores de emissão padrão utilizados pelo IPCC estão relacionados na tabela 2.10 e contemplam diversos tipos de veículos, desde automóveis a navios, dependendo do tipo de combustível utilizado.

Tabela 2.10 - Fatores de emissão de CO₂ por tipo de combustível - em kg/TJ

Combustível	Padrão	Menor	Maior
Gasolina	69.300	67.500	73.000
Querosene	71.900	70.800	73.600
Diesel	74.100	72.600	74.800
Residual Fuel Oil	77.400	75.500	78.800
GLP	63.100	61.600	65.600
Gás Natural	56.100	54.300	58.300

Fonte: IPCC (2006)

Em um estudo realizado no Reino Unido, identificou-se que uma pequena parcela de todo o transporte pelo modal aquaviário era realizado através da navegação fluvial. Apesar de representar apenas 2,5% do total de tonelada-quilometro do transporte aquaviário, o nível de emissão de CO₂ de 30-40 gramas por t.km foi considerado bastante eficiente (MCKINNON, 2007).

Rohács e Simongáti (2007) afirmam em seu estudo que o transporte hidroviário ou fluvial continua sendo um meio de transporte bastante eficiente ambientalmente, apresentando um nível de emissão de CO₂ de 30,9 g/t.km. No entanto, ressalta que o transporte fluvial não consegue operar sozinho, portanto, depende de conexões rodoviárias ou ferroviárias eficientes tanto na origem como no destino.

O relatório setorial sobre navegação interior elaborado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Social (BNDES, 2018) apresenta um nível de emissões de CO₂ de 20 g/t.km para um comboio com capacidade de 6.000 t, utilizando 4 barcas (ou chatas) e 1 empurrador, com consumo de 4,1 litros de diesel para transportar uma tonelada por 1.000 km.

De forma mais específica sobre o transporte hidroviário com o uso de balsas, McKinnon (2007; 2010) recomenda a utilização do fator de emissão de 31 gCO₂/t.km para o cálculo das emissões desse modo de transporte. Tal recomendação foi feita após a análise de diversos fatores publicados, conforme Tabela 2.11.

Tabela 2.11 - Fatores de emissão de CO₂ para transporte fluvial/barcas

Organização	Emissões (g/t.km)
INFRAS	31
TRENDS	31
Tremove	32.5
IFEU	28-35

Fonte: McKinnon (2007)

Segundo TEIXEIRA (2007), o transporte fluvial desenvolve velocidade baixas, e conforme o apurado pela autora, no trecho entre Manaus e Belém, a velocidade média foi de 20 km/h. O tempo de transbordo rodo-fluvial da carga, com base em pesquisas em campo, foi de 4 horas em média para carregar ou descarregar uma balsa com 35 carretas-baú ou com 260 contêineres de 20 pés, ou seja, em média a o tempo de carga ou descarga de uma carreta-baú é de aproximadamente 6,5 minutos e de um contêiner é de aproximadamente 1 minuto.

A Transportadora Bertolini, que opera serviço fluvial entre Manaus e Belém, divulgou dados relativos à sua frota de barcas e rebocadores, onde informa que para barcas com capacidade de até 1.700 t de carga, os empurradores utilizados têm motor de 600 a 1.740 HP (*horse power*, em inglês) (BERTOLINI, 2013).

2.4.4 Emissões do modal rodoviário

O Ministério do Meio Ambiente, durante a elaboração do Primeiro Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários – ANO-BASE 2009 (MMA, 2011), utilizou a metodologia *bottom-up* para estimar o consumo de combustível no transporte rodoviário de cargas, uma vez que os dados de consumo para os diferentes modais agrupavam o transporte de cargas e passageiros. A abordagem *bottom-up* permitiu a desagregação dos dados por categoria de veículos - automóveis, motocicletas, comerciais leves, ônibus urbanos, ônibus interurbanos e caminhões, bem como o desmembramento pelo tipo de combustível utilizado - gasolina, etanol, GNV, diesel de petróleo e biodiesel conforme Tabela 2.12. Esse inventário foi elaborado seguindo os princípios definidos para cálculo das emissões de GEE do IPCC 2006.

Tabela 2.12 - Fatores de emissão de CO₂ para o transporte rodoviário

Tipo de Combustível	Fator de Emissão (kg/l)
Gasolina	2,269
Etanol Anidro	1,233
Etanol Hidratado	1,178
Diesel	2,671
GNV	1,999

Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2011)

Em 2013 foi elaborado o Segundo Inventário Nacional utilizando uma metodologia diferente da utilizada no primeiro inventário. As emissões da frota circulante num determinado ano calendário, para cada poluente e ano-modelo de veículo (Tabela 2.13), foram estimadas com base na seguinte equação:

$$E = F_r * I_u * F_e \quad (2.4)$$

Onde:

E = taxa anual de emissão do poluente considerado, expressa em termos da massa de poluentes emitida por ano (g/ano)

F_r = Frota circulante de veículos do ano-modelo considerado

I_u = Intensidade de uso do veículo do ano-modelo considerado, expressa em termos de quilometragem anual percorrida (Km/ano).

F_e = Fator de emissão do poluente considerado, expresso em termos da massa de poluentes emitida por Km percorrido (g poluentes/Km). É específico para o ano-modelo do veículo e depende do tipo de combustível utilizado

Para os veículos convertidos para GNV foi utilizada uma abordagem *top-down*, devido à falta de informações detalhadas e consistentes sobre a quantidade de veículos convertidos anualmente por ano-modelo. A equação utilizada foi a seguinte:

$$E = C_{gnv} * F_e \quad (2.5)$$

Onde:

E = taxa anual de emissão do poluente considerado, expressa em termos da massa de poluentes emitida por ano – em g/ano

C_{gnv} = Consumo anual de GNV – em m³/ano

F_e = Fator de emissão do poluente considerado, expresso em termos da massa de poluentes emitida por volume de GNV consumido – em g/m³

Para o cálculo das emissões de dióxido de carbono foi utilizada a metodologia do Relatório de Referência - Emissões por Queima de Combustíveis, Abordagem *Bottom-up*, presente na Segunda Comunicação Nacional (MCTI, 2010).

Tabela 2.13 - Fatores de emissão de CO₂ por combustível – transporte rodoviário

Ano	Gasolina Automotiva (kg/l)	Etanol Hidratado (kg/l)	Diesel Mineral (kg/l)	Biodiesel (kg/l)	GNV (kg/l)
1990	2,261		2,686		
1991-1997	2,261		2,674		
1998	2,243		2,646		
1999	2,232	1,457	2,631		1,999
2000	2,220		2,613		
2001-2004	2,212		2,603		
2005-2012	2,212		2,603	2,431	

Fonte: Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas (2013)

Em termos de consumo de combustível para veículos movidos a diesel, a Tabela 2.14 apresenta o consumo em km/l para as diversas categorias de caminhões e ônibus.

Tabela 2.14 - Valores médios de consumo e distância percorrida para veículos do ciclo diesel

Categoria	Consumo de Diesel (l/100km)	Quilometragem por Litro de Diesel (km/l)
Caminhões Semileves	11,0	9,1
Caminhões Leves	18,0	5,6
Caminhões Médios	18,0	5,6
Caminhões semipesados	29,0	3,4
Caminhões Pesados	29,0	3,4
Ônibus Urbano	43,5	2,3
Micro-ônibus	26,0	3,8
Ônibus Rodoviários	33,0	3,0

Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2013)

Comparando os dados de quilometragem por litro de diesel para caminhões pesados da Tabela 2.14 com os dados publicados no Relatório de Emissões Veiculares no Estado de São Paulo – 2015 (CETESB, 2016), pode-se notar que os caminhões produzidos a partir de 2012 apresentam consumo inferior aos produzidos entre 2006 e 2011, conforme Tabela 2.15. No entanto, o mesmo relatório traz a informação de que a idade média da frota de caminhões pesados circulando no Estado de São Paulo em 2015 era de 8,3 anos. Dessa forma, para

efeito de cálculo das estimativas de emissões para o trecho rodoviário será utilizado o consumo de 29 litros de diesel por cada trecho de 100 km rodados e distância percorrida de 3,4 km por litro de diesel, que é o mesmo parâmetro de consumo apresentado pelo (MMA, 2013).

Tabela 2.15 - Distância percorrida por litro de diesel para caminhões pesados - em km/l

Período	Distância
Até o ano 2005	3,5
Entre 2006 e 2011	3,4
Entre 2012 e 2015	3,6

Fonte: CETESB (2016)

O Programa de Monitoramento e Avaliação Europeu (EEA, 2013) sugere para o modal rodoviário a escolha por níveis de dados disponíveis (Figura 2.10), chamados de *Tier* 1, 2 e 3. Quanto maior e mais detalhado o nível do dado disponível, mais específica pode ser a elaboração do cálculo das emissões. É também apresentado uma tabela com fatores de emissão para cada tipo de combustível e que deve ser usado no cálculo das emissões de *Tier* 1 (Tabela 2.16).

Tabela 2.16 - Fatores de emissão de CO₂ para o modal rodoviário - Tier 1

Combustível	Fator de Emissão de CO ₂ (g/kg de Combustível)
Gasolina	3.180
Diesel	3.140
LPG 2	3.017
CNG 3(ou LNG)	2.750
E5 4	3.125
E10 4	3.061
E85 4	2.104

Fonte: EMEP/EEA (2013)

Nota:

CO₂ - Fator de emissão assume 100% de oxidação do carbono

LPG - Assume que é composto por 50% de Butano e 50% de Propano

CNG and LNG - Assume que é 100% Metano

E5, E10 e E85 - Mistura consiste em 5, 10 e 85% do volume de ethanol e 95, 90 e 15% de gasolina

Para o cálculo das emissões rodoviárias, a seguinte expressão é utilizada para o *Tier 1*:

$$E_{rodo} = \sum(CC_a * F_{ea}) \quad (2.6)$$

Onde:

E_{rodo} = Emissões rodoviárias – em kg

CC = Combustível consumido – em kg

F_e = Fator de emissão do tipo de combustível– em g/kg

a = Tipo de combustível

Figura 2.10 – Árvore de decisão para cálculo de emissões rodoviárias

Através da revisão da literatura, foi possível identificar diversos fatores de emissão utilizados por diferentes autores e organizações. A Tabela 2.17 apresenta de forma sumarizada os principais fatores para cada um dos modais de transporte avaliados nesse estudo.

Tabela 2.17 - Comparativo dos fatores de emissão de CO₂ por autor e organização para cada modalidade de transporte

Autor/Organização	Marítimo/Short Sea	Rodoviário	Fluvial
IMO GHG 2009	3.190 kg/t		
MMA 2011		2,671 kg/l	
MMA 2013		2,603 kg/l	
Liao et al. 2010		155 g/t.km	
Hjelle e Fridell 2012	32,1 g/t.km	150 g/t.km	
EMEP/EEA 2013		3,140 kg/kg	
IPCC 2006	77.400 kg/TJ		
McKinnon 2007	16 g/t.km	62 g/t.km	31 g/t.km
Rohács e Simongáti 2007			30,9 g/t.km
BNDES 2018			20 g/t.km

Fonte: Elaborado pelo autor

2.4.5 Emissões marítimas segundo o CCWG (Clean Cargo Working Group)

O *Clean Cargo Working Group* é uma iniciativa dedicada a melhorar a performance ambiental do transporte marítimo por contêiner. Esse grupo é formado por empresas de navegação globais e por empresas embarcadoras e é apoiado pela organização sem fins lucrativos BSR. Em 2015 o grupo publicou um relatório com uma metodologia sugerida, com o objetivo de estabelecer um padrão robusto e amigável de como coletar, calcular e utilizar os dados sobre emissões no transporte marítimo de contêineres. A metodologia proposta inclui quatro princípios base:

- Cálculos de emissão de CO₂ devem ser confiáveis, verificáveis, comparáveis e o mais preciso possível; ainda assim, simples e prático para que transportadores e embarcadores possam aplicar e seguir;

- O total de emissões de CO₂ relacionado ao transporte de contêineres deve ser capturado (incluindo as emissões de retorno vazios e posicionamento de contêineres vazios) e alocado aos contêineres cheios;
- Alocação dever ser, dentro do possível, baseado nos fatores limitadores de capacidade, que para navios de contêiner podem ser definidos em capacidade de contêineres (TEU) e restrições de porte (DWT);
- Comparação da performance do navio é o objetivo principal.

A metodologia faz uma distinção entre contêineres secos e contêineres refrigerados, uma vez que o contêiner refrigerado requer mais energia devido à necessidade de refrigeração (BSR, 2015).

A expressão para cálculo da emissão de um contêiner seco é a seguinte:

$$E_{seco} = \frac{(C - C_r) * IMOF_e}{D * V} \quad (2.7)$$

Onde:

E_{seco} = Emissão de CO₂ por TEU seco – em kg

C = Total de combustível consumido – em t

C_r = Total de combustível consumido com *Reefers* – em t

V = Capacidade do navio – em TEU

D = Distância navegada – em km

$IMOF_e$ = Fator de Emissão - em g/kg – HFO 3.114 g

A expressão para cálculo da emissão de um contêiner refrigerado é a seguinte:

$$E_{reefer} = \frac{C_r * IMOF_e}{D * V_r} \quad (2.8)$$

Onde:

E_{reefer} = Emissão de CO₂ por TEU *reefer* – em kg

C_r = Total de combustível consumido com *Reefers* – em t

V_r = Capacidade do navio para *reefer* – em TEU

D = Distância navegada – em km

$IMOF_e$ = Fator de Emissão - em g/kg – HFO 3.114 g

O total de combustível consumido com contêiner refrigerado é obtido através da seguinte expressão:

$$C_r = V_r * R_c \left(\frac{O_p}{365} \right) \quad (2.9)$$

Onde:

C_r = Total de combustível consumido com *reefer* – em t

V_r = Capacidade do navio para *reefer* – em TEU

R_c = Consumo de contêiner *reefer* por ano – constante de 1.914 kg/TEU

O_p = Dias de operação do navio

O grupo de trabalho identificou ao longo dos últimos anos que, devido ao fato da metodologia utilizar a capacidade máxima dos navios (capacidade nominal) como base para cálculo das emissões, o resultado apurado não estava considerando o volume real de emissões para cada contêiner. Dessa forma, optou-se por obter das empresas transportadoras dados reais do nível de utilização dos navios e ajustar o cálculo tomando-se por base os dados de utilização. Com base nas informações obtidas, o grupo de trabalho adotou 70% como nível médio de utilização apropriado com base na média global de diversos trechos marítimos. Esse percentual é considerado como uma solução pragmática para um problema complexo pois ajuda a melhorar a acuracidade dos cálculos de emissões.

Além do fator de utilização dos navios, o grupo de trabalho também apresenta outros fatores importantes de ajuste nos cálculos e que devem ser seguidos por todos os usuários dessa metodologia. O ajuste de distância para compensar os casos em que as viagens nem sempre seguem a menor distância, com a proposta de ajuste de 15% adicional à menor distância. Outro ajuste proposto

é em relação aos diferentes tamanhos de contêineres secos de 40 pés. Existem os contêineres *standard* e os *high cube*. O segundo apresenta uma altura maior, o que reduz a capacidade do navio. A Tabela 2.18 apresenta os fatores de conversão.

Tabela 2.18 - Fatores de conversão de tipo de contêiner para TEU

Tipo de Contêiner	Conversão para TEU
20'	1.0
40' Standard	2.0
40' High Cube	2.25

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Clean Cargo Work Group

A metodologia assume um peso padrão de 10 toneladas por TEU para todos os contêineres transportados e disponibiliza fatores de emissão para os principais trechos marítimos por transportador para que possam ser utilizados no cálculo das emissões. Outro ponto importante é que a forma de alocação das emissões utiliza a distância percorrida por cada contêiner para atribuir as emissões.

2.4.6 Emissões em terminais portuários

Geerlings e Van Duin (2011) realizaram um estudo no porto de Rotterdam onde analisaram as emissões de CO₂ dos diferentes terminais portuários que operam com movimentação de contêineres. Além de analisar e entender as emissões de CO₂ de cada terminal, os autores tinham também por objetivo entender os processos de transbordo de contêineres em cada terminal, para que esse entendimento pudesse ajudar na busca de soluções que proporcionassem uma operação mais eficiente e reduzir as emissões totais de CO₂.

Uma vez que as emissões de CO₂ são consequência direta da energia utilizada no processo de transbordo do contêiner, o modelo desenvolvido pelos autores buscou identificar os fatores que consomem energia no processo de transbordo. Da mesma forma, os diferentes tipos de equipamentos utilizados nas diversas etapas da movimentação dos contêineres, bem como o consumo de energia, foram incorporados no modelo de cálculo de emissões. Através de uma

abordagem *bottom-up*, o modelo calculou as emissões utilizando o consumo de combustível e energia elétrica dos equipamentos multiplicados pelos fatores de emissões divulgados por agentes públicos como a Agência Americana de Proteção Ambiental (*US Environmental Protection Agency (EPA)* - em inglês).

A análise demonstrou o grande potencial de redução no segmento com a identificação das emissões em cada componente e subsistema do terminal portuário. Ressaltaram também o fator de impacto do *layout* e a disposição dos equipamentos e a possível redução de 20% das emissões totais, considerando-se a substituição de equipamentos obsoletos por novos e a utilização de equipamentos híbridos-diesel, híbridos-biodiesel, diesel e elétricos. Por fim, concluíram que os terminais portuários podem contribuir decisivamente na redução das emissões dos navios enquanto atracados, principalmente a partir da redução de seus tempos de espera e operações. A simples obtenção desses fatores, seja por tipo de contêiner ou por TEU (unidade equivalente a 20 pés), permite a análise de competitividade entre os modais, agregando-se às emissões obtidas em terminais de transbordo. Conhecendo-se as emissões para uma unidade de carga (por exemplo, um TEU) é possível compará-la às alternativas modais de transporte.

Ao analisarmos o Relatório Anual de Sustentabilidade 2013 do operador portuário, Santos Brasil (SANTOS BRASIL, 2014), podemos observar que as emissões apresentadas pelo operador Brasileiro estão próximas aos valores apurados por Geelings e Van Duin (2011). A Tabela 2.19 apresenta o nível de emissão de CO₂ para cada terminal da Santos Brasil e compara com os terminais de Rotterdam.

Tabela 2.19 - Comparativo de emissões de CO₂ entre terminais de Rotterdam e Santos Brasil

Terminal	Rotterdam (2006) CO ₂ (kg/teu)	Santos Brasil (2013) CO ₂ (kg/teu)
Delta	16,73	
Home	15,01	
Hanno	24,00	
APM	16,34	
RST	9,35	
Unipor	17,18	
Tecon Santos		16,23
Tecon Vila do Conde		31,97
Tecon Imbituba		30,37

Fonte: Geelings e Van Duin (2011); Santos Brasil (2014)

No estudo realizado no porto de Itajaí, ano base 2012, identificou-se o consumo de óleo diesel pelas empilhadeiras como a principal fonte de emissão de GEE, representando quase 60% das emissões geradas no terminal portuário (LEITE, 2014).

Nos estudos avaliados fica claro que ainda existe muito potencial para redução no nível de emissões nos terminais. Tanto a utilização de combustíveis menos poluentes, como o biodiesel, assim como a modernização dos equipamentos e o redesenho do layout do terminal têm condições de contribuir para a redução nas emissões.

2.5 Síntese da revisão bibliográfica

Além de abordar diversos fatores relacionados ao transporte por cabotagem, como a importância da intermodalidade no transporte entre Manaus e as demais regiões do país; a história da cabotagem e um pouco de sua característica; alguns dados sobre o modo de transporte alternativo, rodo-fluvial e rodoviário; o foco principal desta revisão bibliográfica está relacionado ao impacto gerado pelos gases de efeito estufa no meio-ambiente, as formas utilizadas para medição e

inventário, e as metodologias aplicadas para cálculo das emissões, principalmente da modal marítimo e aquaviário.

Existe vasta literatura sobre as emissões de CO₂ no transporte marítimo, e esta revisão buscou identificar a metodologia mais adequada para ser aplicada no cálculo das emissões desse modo de transporte, numa operação realizada por uma empresa brasileira.

As principais metodologias de cálculo estão listadas na Tabela 2.20, onde constam também as características chave de cada metodologia.

Tabela 2.20 - Avaliação das metodologias de cálculo de emissões

Metodologia	Dados de Consumo	Acuracidade da Estimativa	Aplicação
<i>Activity-based</i>	Não disponíveis	Menos preciso	Atividades indiretas
<i>Energy-based</i>	Disponíveis	Maior precisão	Atividades diretas
<i>Top-down</i>	Genéricos ou Globais	Menos preciso	Estimativas Globais
<i>Bottom-up</i>	Específicos	Maior precisão	Estimativas pontuais ou locais
<i>Tier 1</i>	Disponíveis	Relativamente preciso	Estimativas gerais para uma frota
<i>Tier 2</i>	Disponíveis	Bem preciso	Estimativas específicas de um tipo de veículo
<i>Tier 3</i>	Disponíveis	Muito preciso	Estimativas específicas para um tipo de motor

Fonte: Elaborada pelo autor com base na literatura

A metodologia *Activity-based approach* é a recomendada para empresas que necessitam medir os níveis de emissões indiretas da sua operação. Por exemplo, um fabricante de veículos que necessita estimar as emissões geradas

durante o transporte de matérias-primas, operação essa que é executada por uma outra companhia. Já a metodologia *Energy-based approach* é a ideal, por exemplo, para uma empresa de transporte que necessita medir as emissões geradas por sua própria operação.

A metodologia *Top-down* é usualmente utilizada para estimar emissões em nível global e utiliza dados bastante genéricos de consumo de combustível nesses cálculos, obtendo assim um resultado não muito preciso. Quando existem dados específicos de consumo e volume de carga, como por exemplo, dados de movimentação de carga e consumo de combustível em um determinado país ou porto, a metodologia *Bottom-up* é a mais recomendada, pois possibilita a obtenção de resultados mais precisos e específicos.

A metodologia por *Tiers* parte sempre do princípio de que os dados de consumo estarão disponíveis, e cada um dos 3 *Tiers* apresenta níveis mais ou menos precisos de cálculo, dependendo do grau de detalhe de consumo que esteja disponível. Quando a estimativa é apenas em nível geral, o *Tier 1* é o mais recomendado por ser também o mais simples, utilizando apenas dados de consumo e fator de emissão. Ao aprofundar a estimativa para um nível mais específico, como por exemplo, para tipos diferentes de veículos, o *Tier 2* é o indicado. Quando a intenção é obter dados de emissões mais detalhados, como por exemplo, para diferentes tipos de motores e potências, a aplicação do *Tier 3* é a recomendada.

A Tabela 2.21 apresenta uma lista dos principais temas abordados nesse capítulo. Já a Tabela 2.22 traz todos os autores constantes dessa revisão assinalando quais temas constantes na Tabela 2.21 foram abordados por cada um deles.

Tabela 2.21 - Índice de temas abordados na revisão da literatura

Índice	Tema Abordado
A	Gases de Efeito Estufa
B	Inventários
C	Metodologias de Cálculo
D	Emissões Marítimas
E	Emissões Rodoviárias
F	Emissões Fluviais
G	Emissões Portuárias
H	Intermodalidade
I	Cabotagem

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 2.22 - Temas abordados por Autor

Autores	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Liao; Tseng; Lu (2009)	X								
Cisneros e Brinati (2009)	X								
Bouzas (2016)	X								
IPCC (2007)	X								
UNDP (2011)	X								
IPCC (2006)		X							
GHG PROTOCOL (2000)		X							
Plambeck (2012)		X							
BSI (2011)		X							
MMA (2014)	X								
Craig (2012)	X	X							
CETESB (2011)		X							
Eyring <i>et al.</i> (2010)			X	X					
Miola <i>et al.</i> (2010)			X						
Miola; Ciuffo (2011)			X						
De Meyer; Maes; Volckaert (2008)			X						
EUROPEAN CHEMICAL INDUSTRY COUNCIL (2011)			X						
Corbett, Fischbeck e Pandis (1999)			X						
Corbett, Wang e Winebrake (2009)			X						
Endresen <i>et al.</i> (2007)			X						
Endresen e Sorga (2003)			X						
Endresen <i>et al.</i> (2005, 2007)			X						
Corbett e Koehler (2004)			X						
Eyring <i>et al.</i> (2005)			X						
Wang, Corbett e Fischbeck (2007)				X					
Dalsoren <i>et al.</i> (2008)				X					
Tzannatos (2010)				X					
Wang e Corbett (2005)			X	X					
Paxian <i>et al.</i> (2010)			X	X					
Georgakaki <i>et al.</i> (2005)				X					
Jalkanen <i>et al.</i> (2009)				X					
Song ; Xu (2012)			X						
Schrooten <i>et al.</i> (2009)			X						
Song <i>et al.</i> (2010)			X						
IMO GHG (2009)			X						
Deniz e Durmusoglu (2008)				X					
Dong-Ping (2010)				X					
Defra (s.d)				X					
MCTI (2010)					X				
Corbett e Fischbeck (2000)					X				
Lee <i>et al.</i> (2010)				X	X				
Liao <i>et al.</i> (2009)				X	X				
Andrade <i>et al.</i> (2014)				X	X				
BSR (2015)				X					
MMA (2011)					X				
Hjelle and Fridell (2012)			X	X	X				
EMEP/EEA Air Pollution Inventory Guidebook (2013)		X	X	X	X				
McKinnon (2007)						X			
Rohács e Simongáti (2007)						X			
McKinnon (2010)						X			
BNDES (2018)						X			
Teixeira (2007)						X			
Bertolini (2013)						X			
Geerlings e Van Duin (2011)							X		
Leite (2014)							X		
Santos Brasil (2014)							X		
Jones, Cassady e Bowden (2000)								X	
Medina <i>et al.</i> (2012)								X	
Santos (2013)									X
ABAC (2014)									X
CNT (2018)									X
ANTAQ (2012)									X
ANTAQ (2014)									X

Fonte: Elaborado pelo autor

3. MÉTODO DE CÁLCULO

Esse capítulo tem por objetivo apresentar um método para o cálculo das emissões de CO₂ para o transporte por cabotagem e para o modo alternativo, que pode ser o rodo-fluvial quando a origem ou destino da carga é a região amazônica ou o puramente rodoviário, que é utilizado para outras regiões do país. Estão descritas as premissas gerais do método desenvolvido, as etapas envolvidas no transporte de cada modal e a formulação matemática para cálculo das emissões de cada um dos modais. Ao final, constam os critérios de uniformização dos resultados dos dois modais para que seja possível uma comparação equivalente, uma vez que as unidades de transporte e suas respectivas capacidades em termos de peso e volumetria são distintas.

Cada modo de transporte avaliado neste capítulo é desmembrado em etapas de transporte, permitindo assim uma melhor organização das análises e maior facilidade no entendimento do nível de emissões de cada trecho ao longo de todo o trajeto percorrido. Ao desmembrar as etapas do modo de transporte, o método aplicado possibilita o cálculo de qualquer tipo de combinação intermodal, não se restringindo apenas aos modos em estudo nessa dissertação. Basta que as rotas, os volumes transportados e os dados de consumo sejam conhecidos para que as emissões de cada etapa possam ser estimadas e assim como as emissões totais.

Como apresentado na revisão da literatura, a grande maioria dos estudos elaborados sobre emissões do modo marítimo utilizam as diretrizes do IPCC (2006) como metodologia principal para cálculo das emissões. Apesar de mais restrita, a bibliografia sobre cabotagem, ou *short sea shipping*, como conhecida internacionalmente, também apresenta o IPCC como principal metodologia para cálculo das emissões. Além de mais utilizada e conhecida internacionalmente, as diretrizes de cálculo do IPCC apresentam diferentes níveis de cálculo com base no consumo de combustível, do mais simples até o mais complexo, do menor ao maior nível de profundidade dos dados. Dessa forma, o método adotado permite que,

mesmo possuindo apenas dados agregados de consumo de combustível, seja possível estimar o total de emissões de cada alternativa de transporte.

3.1 Premissas gerais do método de cálculo

O método desenvolvido neste trabalho se aplica ao transporte por cabotagem porta-a-porta para carga containerizada, entre a cidade de Manaus (AM) e a cidade de São Paulo (SP), incluindo as demais etapas do trajeto além do trecho aquaviário ou marítimo percorrido. Considera-se que o ponto de origem ou destino da carga não seja necessariamente o porto de origem ou destino. Dessa forma, uma etapa de transporte rodoviário é adicionada ao trajeto da carga, na origem e destino. Importante ressaltar que, caso um outro modo de transporte diferente do rodoviário seja utilizado para posicionar a carga no porto de origem ou para transferir do porto de destino ao ponto final da carga, o método aqui desenvolvido pode, de igual forma ser aplicado, bastando obter os dados de consumo e ajustar o fator de emissão para o do modal utilizado. Para situações onde, eventualmente, o ponto de origem ou destino da carga sejam o porto de origem ou destino, basta desconsiderar as etapas relacionadas ao transporte rodoviário para que o cálculo seja realizado. Para o modal alternativo, é contemplada a mesma origem e o mesmo destino para o transporte rodo-fluvial.

Os pontos de origem ou de destino da carga são usualmente fábricas ou armazéns logísticos, e para o cálculo do trecho rodoviário é necessário apenas obter a distância em quilômetros até o porto de origem, ou a partir do porto de destino. Esse mesmo método é aplicado para o cálculo do modal alternativo.

Para o cálculo das emissões da cabotagem foi considerado um trecho rodoviário de 10 km na origem, distância essa entre o Distrito Industrial de Manaus e o porto. No destino foi considerado a distância de 95 km que é o trecho rodoviário entre o porto de Santos e a cidade de São Paulo. Para o modal alternativo a mesma distância na origem foi considerada, porém para o trecho de viagem até o destino

final foi considerada a distância de 2.926 km, que é o percurso a ser percorrido por caminhão desde Belém até São Paulo.

A etapa de movimentação portuária é calculada com base em dados obtidos na literatura, sendo estimada com base no volume de contêineres (TEU) movimentados, no caso da cabotagem. Para o modal alternativo rodo-fluvial, as emissões são estimadas tomando-se em consideração a distância percorrida pelo cavalo-mecânico para posicionar as carretas desde o pátio de manobra até a barça e vice-versa no porto fluvial de destino. Quando o modal alternativo é puramente rodoviário, essa etapa do trajeto deve ser desconsiderada no cálculo das emissões.

Outra premissa importante deste método de cálculo é de que os serviços de cabotagem para contêiner costumam ter portos pré-definidos onde operam e, portanto, o cálculo das distâncias rodoviárias toma como porto de origem ou destino os portos mais próximos da origem ou destino da carga e que fazem parte do serviço regular.

Com relação ao tipo de carga transportada, a cabotagem é utilizada principalmente no transporte de lotes consolidados, conhecidos com FCL (*full container load*, em inglês). Isso significa que, na grande maioria das vezes, a carga tem um único ponto de origem e um único ponto de destino. Não existe limitação ao tipo de produto transportado em contêiner, desde que o mesmo possa ser acomodado dentro das dimensões do mesmo.

Os cálculos de emissão da cabotagem porta-a-porta são realizados por TEU (contêiner de 20 pés com 33,3m³ e 21,760 t de capacidade de carga, conforme Figura 2.3), com peso médio estimado de 8 t, já incluindo a tara de 2,240 t., conforme dados reais obtidos de um operador de cabotagem. Para o modal rodo-fluvial e rodoviário, o cálculo será feito por carreta-baú (capacidade de carga de até 27 t. e 100m³ com uma tara de 9 t) com um peso estimado de carga de 17,3 t (este cálculo leva em consideração o peso médio da carga do contêiner de 5,76 t e

multiplicado pelo fator 3 que é o quanto de capacidade em m³ a carreta-baú pode levar em relação ao contêiner de 20 pés).

Por fim, não são considerados aspectos detalhados da geometria horizontal e vertical das rodovias, nem da qualidade dos pavimentos, uma vez que tais informações não estão disponíveis e dependeriam de levantamentos de campo.

3.2 Detalhamento dos dados utilizados para cálculo

Para cada um dos modais de transporte e para cada uma das etapas, diversos conjuntos de dados são utilizados para o cálculo das emissões. A Tabela 3.1 apresenta os dados do modal cabotagem porta-a-porta. Os dados do modal alternativo são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 - Dados utilizados no cálculo do modal cabotagem

Etapa	Dado	Valor	Unidade	Fonte
I – Rodoviária-origem	Fator de emissão	2,603	Kg/l	MMA (2013)
	Distância percorrida	10	Km	Google maps
	Consumo de diesel	3,4	Km/l	MMA (2013)
II – Porto-origem	Fator de emissão	31,97	Kg/TEU	Santos Brasil (2013)
	Quantidade movimentada	1	TEU	Rodrigues (2019)
III – Etapa Aquaviária	Fator de emissão	3.190	Kg/t	IMO GHG (2009)
	Consumo por viagem completa	800	t	Operador de cabotagem
	Tempo de viagem completa	28	d	Operador de cabotagem
	Volume médio do trecho de descida	1.738	TEU	Operador de cabotagem
	Volume médio do trecho de subida	1.683	TEU	Operador de cabotagem
	Tempo de viagem até Santos	13	d	Operador de cabotagem
IV – Porto-destino	Fator de emissão	16,23	Kg/TEU	Santos Brasil (2013)
V – Rodoviária-destino	Distância percorrida	95	Km	Google maps

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 3.2 - Dados utilizados no cálculo do modal alternativo

Etapa	Dado	Valor	Unidade	Fonte
I – Rodoviária-origem	Fator de emissão	2,603	Kg/l	MMA (2013)
	Distância	10	Km	Google maps
	Consumo de diesel	3,4	Km/l	MMA (2013)
II – Porto fluvial-origem	Fator de emissão	2,603	Kg/l	MMA (2013)
	Distância percorrida	2	km	Rodrigues (2019)
III – Etapa Aquaviária	Fator de emissão	20	g/t.km	BNDES (2018)
	Fator de emissão	31	g/t.km	McKinnon (2007)
	Distância percorrida	1.606	km	Marinetraffic
	Peso Transportado (carga e tara)	26,3	t	Rodrigues (2019)
IV – Porto fluvial - destino	Idem etapa II			
V – Rodoviária-destino	Distância	2.926	Km	Google maps

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 Detalhamento das etapas do modal cabotagem porta-a-porta

Nessa seção é apresentado um detalhamento de cada etapa do transporte por cabotagem porta-a-porta, com informações adicionais sobre o tipo de equipamento ou veículo utilizado e, de forma sucinta, como funciona a operação. Como mencionado anteriormente, o método contempla o transporte entre Manaus, cujo porto está localizado na mesma cidade; e a cidade de São Paulo, cujo porto mais próximo está na cidade de Santos, como rota base para cálculo das emissões. No entanto, essa não é a única rota importante de transporte por cabotagem e, portanto, o capítulo de resultados inclui o cálculo de emissões para outras rotas possibilitando que seja realizada a comparação entre os modais também nessas outras rotas.

I - Etapa Rodoviária-Origem: Está relacionada à operação de transporte por modal rodoviário do contêiner carregado onde o mesmo é levado da fábrica ou armazém até o porto de origem. Este trajeto é usualmente realizado por um cavalo

mecânico e por um chassi, sobre o qual os contêineres de 20 ou 40 pés são transportados, conforme Figura 3.1.

Figura 3.1 – Modelo de veículo para transporte rodoviário de contêiner de 40 pés

Fonte: Loja Hobby Zone (2017)

II - Etapa Porto-Origem: Engloba as atividades relacionadas à movimentação do container no terminal portuário, incluindo as etapas de descarregamento ou retirada do contêiner do chassi, posicionamento no pátio para esperar a data do carregamento e posteriormente, o carregamento no navio. As Figuras 3.2, 3.3 e 3.4 apresentam imagens das operações portuárias compreendidas nessa etapa.

Figura 3.2 – Operação de carga e descarga em terminal portuário

Fonte: Grupo Chibatão (2017)

Figura 3.3 – Operação de movimentação de contêiner em pátio

Fonte: Blog da Floresta (2017)

Figura 3.4 - Operação de carregamento e descarregamento de navio

Fonte: Liebherr (2017)

III - Etapa Trecho Aquaviário/Marítimo: Está relacionada ao transporte por modal cabotagem desde o porto de origem até o porto de destino ou transbordo. Normalmente os contêineres embarcados na cabotagem viajam em navio, conforme Figura 4.5. A capacidade de um navio é normalmente definida em TEU, ou seja, quantos contêineres de 20 pés o navio consegue carregar. O outro fator de definição de capacidade do navio é o peso total transportado, em toneladas.

Figura 3.5 – Exemplo de navio utilizado na cabotagem

Fonte: Mercosul Line (2014)

IV - Etapa Porto-Destino: Está relacionada à operação de descarregamento do navio, movimentação do contêiner até o pátio de armazenagem e posterior carregamento do contêiner em um novo veículo para realização da última etapa, o trecho rodoviário.

V - Etapa Rodoviária-Destino: Refere-se ao transporte por modal rodoviário do porto de destino até o destino final da carga. O veículo que usualmente realiza esta operação é um cavalo mecânico com um chassi, conforme Figura 3.1, que pode transportar dois contêineres de 20 pés ou um contêiner de 40 pés.

3.4 As etapas do modo alternativo

O transporte rodo-fluvial engloba etapas similares ao transporte de cabotagem. No entanto, o transporte puramente rodoviário contempla menos etapas, pois não requer a etapa de porto fluvial nem na origem e nem no destino, e também não percorre o trecho aquaviário.

I - Etapa Rodoviária-Origem: Contempla a operação de transporte por modal rodoviário da carreta baú, sendo movimentada da fábrica ou centro de armazenagem até o porto de origem. Normalmente é utilizado para este transporte um cavalo mecânico e uma carreta baú, conforme Figura 3.6.

Figura 3.6 – Exemplo de veículo utilizado no transporte rodoviário

Fonte: Cartão Caminhoneiro (2017)

II - Etapa Porto Fluvial-Origem: Engloba as atividades relacionadas à movimentação da carreta-baú no terminal fluvial, incluindo as etapas de manobra, estacionamento no pátio e movimentação das carretas até a barcaça tipo *Roll-on/Roll-off*. O cavalo mecânico que realizou o transporte rodoviário deixa a carreta-baú no pátio aguardando o embarque até a barcaça. Para o embarque normalmente é utilizado um cavalo mecânico de propriedade do operador portuário que faz a manobra e posicionamento da carreta-baú sobre a barcaça. A Figura 3.7 apresenta um modelo de terminal fluvial.

Figura 3.7 - Exemplo de terminal fluvial

Fonte: Transportadora Bertolini (2017)

III - Etapa Trecho Aquaviário: Está relacionada ao transporte por modal fluvial, do porto fluvial de origem até o porto fluvial de destino ou transbordo. As barcas Ro-Ro (*roll-on/roll-off*) transportam apenas a carreta baú entre um porto e outro. A Figura 3.8 apresenta um exemplo de barcaça fluvial movimentando carretas-baú.

Figura 3.8 - Exemplo de barcaça fluvial Ro-Ro

Fonte: Transportadora Bertolini (2017)

IV - Etapa Porto Fluvial-Destino: Está relacionado à operação de descarregamento da barcaça e a movimentação das carretas-baú até o pátio de espera. Posteriormente, uma novo cavalo-mecânico é utilizado para a realização da viagem rodoviária conforme Figura 3.6. A movimentação das carretas-baú entre a barcaça e o pátio de espera é realizada com o uso de um cavalo-mecânico.

V - Etapa Transporte Rodoviário-Viagem: Contempla a viagem rodoviária entre o porto fluvial de destino até o destino final da carga. A carreta-baú é engatada em um cavalo-mecânico que realiza a viagem até o destino. O tipo de veículo utilizado é exemplificado na Figura 3.6.

3.5 Método de cálculo de emissões para a cabotagem porta-a-porta

Durante a revisão da bibliografia, já detalhada no capítulo 2, foram identificados os dois métodos de cálculo, baseado na atividade e baseado na energia ou combustível. Foram também contempladas diferentes abordagens de cálculo das emissões, partindo da mais genérica (*top-down*) para a mais específica

(*bottom-up*). Adicionalmente, foi identificada também a metodologia utilizada pela Agência Europeia de Meio-Ambiente (EEA), que apresentou o conceito de níveis (*tiers*, em inglês), baseado no nível de informação e dados disponíveis. Para alguns dos subsistemas, onde o nível de informação sobre o consumo de combustível não está disponível, o método de cálculo utilizado será o baseado na atividade. Para o cálculo do subsistema viagem aquaviária de cabotagem, onde possuímos dados reais de consumo, será aplicado o método baseado na energia ou combustível, *Tier* 1, também utilizado pelo IPCC, (2006).

3.5.1 Etapa rodoviária-origem e rodoviária-destino

As emissões de CO₂ para essa etapas são calculadas aplicando-se os fatores de emissões utilizados no Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas - ANO-BASE 2012 (MMA, 2013) para o diesel mineral, conforme Tabela 2.13. A escolha dos fatores de emissão utilizados pelo Ministério do Meio Ambiente deve-se ao fato de que esses fatores refletem com mais representatividade o perfil da frota brasileira de veículos. O método de cálculo é baseado na energia ou combustível, uma vez que, através da combinação de diferentes dados, é possível se estimar a quantidade de combustível consumido para percorrer determinadas distâncias.

Para calcular a quantidade de combustível consumido, será aplicada a mesma metodologia utilizada na elaboração do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (MMA, 2013), obtendo-se a distância entre os pontos e dividindo pela quilometragem por litro de diesel, utilizando-se a categoria de caminhões pesados, segundo a Tabela 2.14.

A expressão 3.1 possibilita o cálculo da quantidade de combustível:

$$E_{rodo} = \left(\frac{D}{C}\right) F_e \quad (3.1)$$

Onde:

E_{rodo} = Emissão rodoviária de CO₂ por viagem – em kg

D = Distância percorrida entre ponto A e ponto B – em km

C = Fator de consumo unitário de combustível (diesel) do veículo – em km/l

F_e = Fator de Emissão - em kg/l

A Tabela 3.3 apresenta as emissões de CO₂ com base em diferentes distâncias percorridas, utilizando o consumo sugerido pelo MMA (2013) de 3,4 km/l e o fator de emissão de 2,603 kg/l.

Tabela 3.3 - Estimativa de emissão de CO₂ por distância percorrida

Distância Percorrida (km)	Quantidade de Combustível (l)	CO ₂ emitido (kg)
10	2,94	7,66
30	8,82	22,97
50	14,71	38,28
100	29,41	76,56
130	38,24	99,53
150	44,12	114,84
200	58,82	153,12
250	73,53	191,40

Fonte: Elaborado pelo autor

3.5.2 *Etapas porto-origem e porto-destino*

Quando os terminais portuários de contêiner calculam as emissões geradas em suas operações, esse cálculo é normalmente realizado com base na quantidade de TEU movimentados pelo terminal. Dessa forma, é possível encontrar na literatura alguma informação sobre o nível de emissões de CO₂ para cada TEU movimentado por alguns portos ao redor do mundo. No entanto, no Brasil as informações sobre as emissões geradas nos terminais portuários são bastante limitadas. Assim, o modelo de cálculo proposto utiliza os valores de emissões de CO₂ para cada TEU movimentado com base nos dados divulgados pelo Terminal Santos Brasil, constantes da Tabela 2.18, capítulo 2. A escolha dos dados do Terminal Santos Brasil deve-se ao fato de que se trata de um terminal brasileiro, que opera nas regiões Norte, Sudeste e Sul do país. Desta forma, acredita-se que

o mesmo reflita melhor a realidade de uma operação portuária no Brasil, com suas limitações e desafios, versus os demais terminais portuários em outros países. Os dados apurados pelo operador Santos Brasil contemplam todas as emissões diretas da companhia, para cada um dos portos em que opera, incluindo as emissões geradas pelos equipamentos utilizados nos terminais portuários, energia elétrica e combustíveis para os veículos que operam dentro dos terminais. As emissões diretas estão relacionadas às atividades de recebimento e retirada dos contêineres no terminal portuário, movimentação dentro do terminal dos contêineres para posicionamento e armazenagem, e carregamento e descarregamento dos navios.

Como não existem dados disponíveis sobre as emissões do terminal de contêineres de Manaus, optou-se por utilizar os dados de emissão do terminal Santos Brasil localizado no porto de Vila do Conde, próximo a Belém – PA, como referência, uma vez que ambos os terminais estão localizados na região Norte do país. Os dados de emissões do Tecon Santos serão aplicados para os portos no Sudeste e os dados do Tecon Imbituba para os portos do Sul do país.

A expressão para cálculo é a seguinte:

$$E_{porto} = V_m * F_e \quad (3.2)$$

Onde:

E_{porto} = Emissão portuária de CO₂ por TEU – em kg

V_m = Quantidade de TEU movimentado

F_e = Fator de Emissão - em kg/TEU

3.5.3 Etapa trecho aquaviário/marítimo

Essa etapa é estimada aplicando-se dois métodos de cálculo diferentes, de forma que possam ser comparados ao final e analisados para entender qual deles é o mais adequado para o cálculo das emissões totais. O primeiro método é o baseado na Energia (*energy-based approach*) uma vez que, através da análise dos

dados do operador de cabotagem, é possível obter dados confiáveis de consumo por TEU. O segundo método segue a recomendação do *Clean Cargo Working Group* (BSR, 2015).

I – *Energy-based approach*

Para o método baseado na energia (*Energy-based approach*) a expressão de cálculo utilizada é a 2.2, detalhada na seção 2.4.2. O fator de emissão utilizado neste método é o recomendado pelo IMO (2009) conforme Tabela 2.5. Para que seja apurado o consumo médio de combustível por TEU, para o trecho de descida, entre Manaus e Santos, é necessário apurar o consumo de combustível para cada trecho de viagem, subida e descida, utilizando o consumo total dividido pelo tempo total da viagem completa e multiplicado pelo tempo de viagem de cada trecho, conforme a expressão (3.3):

$$C_{trecho} = \left(\frac{C_{médio}}{T_{viagem completa}} \right) T_{viagem trecho} \quad (3.3)$$

Onde:

C_{trecho} = Consumo médio por trecho – em t

$C_{médio}$ = Consumo médio durante período de 31 viagens – em t

$T_{viagem completa}$ = Tempo de uma viagem completa – em d

$T_{viagem trecho}$ = Tempo de um trecho de viagem – em d

Após a apuração do consumo para o trecho de subida, é possível estimar o consumo para cada TEU transportado nesse trecho, conforme a expressão:

$$C_{teutreacho} = \left(\frac{C_{trecho}}{V_{trecho}} \right) / 1000 \quad (3.4)$$

Onde:

$C_{teutreacho}$ = Consumo de combustível por TEU para o trecho – em kg

C_{trecho} = Consumo médio por trecho – em t

V_{trecho} = Volume médio transportado – em TEU

II - CCWG

O método sugerido pelo CCWG (2015) é utilizado pelos maiores operadores marítimos globais e foi elaborado seguindo as diretrizes do IPCC (2006). Utiliza o método baseado na energia ou combustível, escopo *Tier 1*, o mesmo utilizado pelo IPCC (2006), através da multiplicação do total de combustível consumido pelo seu respectivo fator de emissão. O combustível utilizado pelos navios de grande porte é o HFO (*Heavy Fuel Oil*, em inglês), conhecido como *bunker*. A abordagem *bottom-up* é mais precisa e específica e é possível sua aplicação pois existem dados históricos reais de consumo de combustível fornecidos por uma empresa brasileira de navegação.

A metodologia utiliza o consumo total do navio numa viagem redonda e multiplica pelo fator de emissão, apurando assim o total de emissões geradas na viagem. Esse total é dividido pelo movimento total de transporte, ou seja, a quantidade total de contêineres que foram transportados multiplicados pela distância navegada. A metodologia permite calcular também as emissões de um contêiner refrigerado. No entanto, como nos dados obtidos não estão disponíveis a quantidade de contêineres refrigerados, toda a estimativa será realizada considerando apenas o transporte de contêineres secos. A metodologia também assume que o nível médio de utilização dos navios é de 70% e sugere um ajuste de 15% a mais na distância navegada como forma de compensar desvios nas viagens. O peso médio considerado pela metodologia é de 10 t por TEU. Para o cálculo da distância navegada é utilizada uma ferramenta web www.marinetraffic.com que permite calcular a distância entre um porto e outro ao redor do mundo. O fator de emissão para o combustível *bunker* (HFO) aplicado nessa metodologia é de 3.114 g CO₂/kg conforme IMO (2009).

A expressão para cálculo é a seguinte:

$$E_{serv} = \left(\frac{C * IMOFe}{D * V} \right) \quad (3.5)$$

Onde:

E_{serv} = Emissão de CO₂ por TEU.km para o serviço – em kg

C = Consumo de combustível – em kg

V = Capacidade do navio – em TEU

D = Distância navegada – em km

$IMOF_e$ = Fator de Emissão - em g de CO₂ por kg de combustível

O cálculo dessa etapa é realizado tomando-se em consideração os dados reais de consumo e utilização dos navios fornecidos pelo operador. Os dados obtidos apresentam um nível médio de utilização de 68,5% em peso e 68,4% em quantidade de TEU, para um período de quase 1 ano e 31 viagens completas, o que demonstra que os dados apresentam níveis bastante similares ao sugerido pelo CCWG (2015). Por viagem completa entende-se o navio que iniciou em um porto e após passar por todos os portos do serviço, retornou ao porto inicial.

O cálculo utiliza o consumo médio de combustível durante todo esse período e, de igual forma, a quantidade total de contêineres transportados. Dessa forma, o consumo médio apurado por contêiner transportado reflete as diversas situações pela qual tenham passado os navios durante essas viagens, tais como: mau tempo, atrasos em portos, necessidade de acelerar o navio, viagens subutilizadas, omissões de portos, dentre outras. Ao aplicar o consumo médio por contêiner, acaba-se utilizando um cenário conservador para cálculo das emissões pois assume-se que todos os contêineres estiveram a bordo dos navios durante todo o trajeto percorrido, seja na viagem de subida como na de descida (Sul para Manaus e vice-versa). Em outras palavras, assume-se uma ocupação média no navio em cada sentido, e que todos os contêineres percorreram todo o trecho de subida ou descida.

Importante ressaltar que, no transporte marítimo, nem sempre ocorre um grande impacto no consumo de combustível das embarcações o fato de que o mesmo está transportando pouca carga. Isso ocorre devido à necessidade de encher os tanques de lastro para manter o equilíbrio do navio, principalmente quando o mesmo tem pouca carga. Dessa forma, mesmo que em algumas viagens

o nível de utilização seja menor que em outras, não significa que o consumo tenha sido significativamente menor.

Para o cálculo de emissões para trechos específicos, como por exemplo, contêineres que tenham sido embarcados em Manaus, mas que foram desembarcados em Suape, basta utilizar o resultado apurado como nível de emissão por TEU.km para esse serviço e multiplicar pela quantidade de TEU e pela distância em km percorrida. A expressão a seguir apresenta o cálculo:

$$E_t = E_{serv} * V_t * D \quad (3.6)$$

Onde:

E_t = Emissão Total de CO₂

E_{serv} = Emissão de CO₂ do serviço por TEU.km – em kg

V_t = Quantidade de contêineres transportados - em TEU

D = Distância navegada - em km

3.6 Método de cálculo de emissões para o modo alternativo

O modal alternativo contempla dois tipos de transporte: o rodo-fluvial e o rodoviário. O rodo-fluvial é utilizado principalmente na rota entre Manaus e as demais regiões do país, sendo essa a principal rota de cálculo para comparação entre os modais neste trabalho. No entanto, existem outras rotas que são percorridas utilizando apenas o modal rodoviário e, por essa razão, para que seja possível comparar as emissões nessas outras rotas, o modal puramente rodoviário é estimado e comparado com a cabotagem porta-a-porta.

3.6.1 Etapa rodoviária-origem e rodoviária-destino

Essa etapa, como já mencionado na seção 3.3, contempla a movimentação da carreta-baú do ponto inicial até o porto de embarque rodo-fluvial ou do porto

fluvial de destino até o destino final da carga. O cálculo das emissões segue o mesmo método aplicado para a etapa rodoviária do modal cabotagem (Expressão 3.1), pois é basicamente o mesmo tipo de operação de transporte. No entanto, sempre que se trata de uma carga FTL (*full truck load*), a etapa rodoviária-destino é eliminada, pois o veículo que realiza a viagem já segue direto para a entrega da carga, eliminando assim essa etapa no destino. Caso a carga seja direcionada primeiro para um armazém da empresa transportadora, para posterior entrega ao destinatário final, essa etapa deve ser incluída no cálculo das emissões. Essa mesma etapa e metodologia de cálculo deve ser aplicada para o modal puramente rodoviário.

3.6.2 *Etapa porto fluvial-origem e porto fluvial-destino*

Não foi encontrado na literatura nenhum estudo que apresentasse cálculos de emissões de CO₂ para a operação de carregamento e descarregamento de barcas conforme o modelo de operação que ocorre nos portos fluviais brasileiros, onde carretas-baú são transportadas de um porto a outro através de barcas *roll-on/roll-off* (os veículos são manobrados sobre a barca com o suporte de um cavalo-mecânico ou sem suporte, quando são equipados com motor próprio. Por exemplo, um caminhão de pequeno porte ou um veículo de passageiro). Dessa forma, buscou-se elaborar uma metodologia para estimar essas emissões, tomando-se em consideração a operação que ocorre nesses terminais portuários.

Conforme mencionado na seção 3.3, as carretas-baú são estacionadas em um pátio de espera até o momento de serem colocadas sobre as barcas. De igual forma, quando chegam ao destino são descarregas da barca e levadas a um pátio, onde aguardam o início da viagem para o destino final. Essa operação de manobra é feita com a utilização de um cavalo-mecânico. Os pátios de espera, com base em observação visual da operação nos terminais de Manaus, estão a distâncias não superiores a 2 km de onde efetivamente encontram-se as barcas. Dessa forma, optou-se por estimar as emissões da etapa porto fluvial, origem e destino, levando-se em consideração o uso de um cavalo-mecânico e de um

percurso rodoviário de 2 km para cada carreta-baú embarcada ou desembarcada, já considerando a distância de ida até a barça e o retorno ao pátio.

A expressão para cálculo é a seguinte:

$$E_{portofluvial} = \left(\frac{D}{C}\right) F_e \quad (3.7)$$

Onde:

$E_{portofluvial}$ = Emissão de CO₂ por carreta-baú – em kg

D = Distância percorrida entre ponto A e ponto B – em km

C = Distância percorrida por litro de Diesel – em km/l

F_e = Fator de Emissão - em kg/l

O tipo de veículo utilizado, o consumo de combustível e o fator de emissão aplicados nessa etapa são os mesmos utilizados na etapa rodoviária, tanto do modo cabotagem, como do modo alternativo.

Essa etapa deve ser suprimida para o cálculo do modal puramente rodoviário, uma vez que não ocorre o uso de porto fluvial no trajeto.

3.6.3 Etapa trecho aquaviário

O cálculo das emissões da etapa trecho aquaviário é realizado com base no fator de emissão apurado pelo relatório setorial sobre a navegação interior (BNDES, 2018) que indica como fator de emissão de CO₂ 20g/t.km. Para efeito de cálculo do total de peso transportado é necessário adicionar ao peso da carga o peso da carreta-baú, conhecido pelo nome de tara. As carretas-baú podem variar sua tara dependendo da quantidade de eixos que possuam. No entanto, para o cálculo deste estudo foi considerado o modelo mais tradicional de carretas-baú, as que possuem 3 eixos, e que, portanto, tem uma tara de 9 toneladas. A distância utilizada para o trecho entre Manaus e Belém é de 1.606 km (BERTOLINI, 2013).

O cálculo é realizado com base na seguinte expressão:

$$E_{fluvial} = \left(\frac{D * P * F_e}{1000} \right) \quad (3.8)$$

Onde:

$E_{fluvial}$ = Emissão de CO₂ por carreta-baú transportada – em kg

D = Distância percorrida entre ponto A e ponto B – em km

P = Peso transportado – em t

F_e = Fator de Emissão - em g/t.km

A etapa de trecho aquaviário não deve ser calculada quando o modal alternativo é o puramente rodoviário.

3.6.4 Etapa transporte rodoviário-viagem

Como já mencionado na seção 3.3, essa etapa consiste na viagem entre o porto fluvial e o destino final da carga. Para esse transporte são utilizados cavalos mecânicos ou tratores da categoria de caminhões pesados e, portanto, é aplicado no cálculo das emissões os mesmos critérios usados nas etapas rodoviárias origem e destino (Expressão 3.1). A Tabela 3.4 apresenta uma estimativa de emissões para diferentes distâncias rodoviárias, considerando 3,4 km/l como consumo e fator de emissão de 2,603 kg/l de diesel.

Tabela 3.4 - Estimativa de emissão de CO₂ por distância rodoviária percorrida

Distância Percorrida (km)	Quantidade de Combustível (l)	CO ₂ emitido (kg)
500	147,05	382,79
1.000	294,12	765,58
2.000	588,23	1.531,17
3.000	882,35	2.296,76

Fonte: Elaborado pelo autor

Quando o modo de transporte alternativo é o puramente rodoviário, a mesma metodologia de cálculo deve ser aplicada.

As Figuras 3.9 e 3.10 sintetizam o método de cálculo aplicado a cada uma das etapas envolvidas com o transporte do modal cabotagem porta-a-porta e do modal alternativo.

3.7 Critérios para uniformização dos resultados

É necessário uniformizar os resultados das emissões entre os dois modais de transporte porque a capacidade de carga de um TEU é diferente da capacidade de carga de uma carreta-baú. A uniformização busca equalizar o cálculo das emissões da cabotagem em TEU para ser comparável com a carreta-baú, considerando a maior capacidade de carga da carreta.

O contêiner de 20 pés, unidade utilizada para medir as emissões da etapa trecho aquaviário da cabotagem, tem capacidade para 33,3 m³ de carga e peso máximo de carga de 21,760 t. Por sua vez, a carreta-baú tem capacidade para 100 m³ e até 27 t de peso.

Com base nos dados reais analisados, o peso médio de um contêiner de 20 pés no trecho entre Manaus e São Paulo é de 5,76 t de carga. Aplicando-se esse perfil de peso de carga do contêiner para a carreta-baú, chega-se ao peso de 17,3 t de carga para a carreta-baú nesse mesmo trecho. Isso significa que as carretas-baú que saem de Manaus não utilizam toda a sua capacidade em peso, mas sim em volume de carga. Fazendo uma equiparação, cada carreta-baú transportada equivale à mesma capacidade volumétrica de 3 TEU.

Na comparação das emissões totais de cada modo de transporte, para emissões geradas por uma carreta-baú transportada é considerada a emissão de 3 TEU para as etapas porto-origem, trecho aquaviário e porto-destino. Para a etapa rodoviária-origem e destino, é considerada 1,5 viagens. A razão pela qual é

considerada apenas 1,5 viagens é que o transporte rodoviário de contêineres acomoda até 2 TEU no mesmo chassi, sempre que o peso total não ultrapasse as 27 t. Como o peso na rota entre Manaus e São Paulo é de apenas 5,76 t por TEU, apenas 1,5 caminhões seriam necessários para transportar os 3 TEU. Não foi considerado que seriam necessários 2 caminhões para movimentar os 3 TEU porque, de forma geral, quando um caminhão tem que realizar uma viagem com apenas 1 contêiner de 20 pés (1 TEU), os transportadores combinam cargas de outros clientes na mesma viagem.

Este critério de uniformização se aplica apenas nesse perfil de carga, onde o peso médio por TEU é bastante baixo (5,7 t) e o ajuste é feito para uniformizar o uso total da capacidade da carreta em volume de carga e não peso. Para um perfil de carga onde o peso médio por TEU é de 20 t, um critério de uniformização diferente deve ser aplicado, conforme simulação constante na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Critérios de uniformização entre TEU e carreta-baú para comparação de emissões

Peso por TEU (t)	Capacidade de Carga Utilizada (m ³) (máx. 33,3 m ³)	Quantidade de TEU equivalente a uma carreta-baú (27 t ou 100m ³)	Quantidade considerada para uniformização da Etapa Rodoviária Origem e Destino	Quantidade considerada para uniformização da Etapa Porto Origem/ Destino e Trecho Aquaviário	Capacidade de Carga Utilizada numa Carreta-baú (t) (máx. 27 t)	Capacidade de Carga Utilizada numa Carreta-baú (m ³) (máx. 100 m ³)
5,760	33,3	3	1,5 Viagem	3 TEU	17,3	100,0
10,0	33,3	2,7	1,5 Viagem	3 TEU	27,0	90,0
15,0	33,3	1,8	1 Viagem	2 TEU	27,0	59,9
20,0	33,3	1,35	1 Viagem	2 TEU	27,0	44,9
21,760	33,3	1,24	1 Viagem	2 TEU	27,0	41,3

Fonte: Elaborado pelo autor

Unidade de Transporte		Contêiner de 20 pés Equivalente a 1 TEU	Capacidade de carga: 21,7 t Capacidade volumétrica: 33,38 m ³ Tara: 2,24 t
Etapa Rodoviária - Origem		Cavalo mecânico com chassi para transporte do contêiner até o porto	$(\text{km percorrido} / \text{Consumo (km/l)}) \times \text{Fator de Emissão (kg/l)} = \text{emissões (kg)}$
Etapa Porto - Origem		Movimentação do contêiner desde o descarregamento do caminhão até o carregamento no navio	Quantidade de TEU movimentado X Fator de Emissão (kg/TEU) = emissões (kg)
Etapa Trecho Aquaviário		Transporte em navio até o porto de destino	$(\text{Consumo de Combustível por viagem (kg)} \times \text{Fator de Emissão}) / (\text{Distância percorrida (km)} \times \text{Capacidade do navio (TEU)}) = \text{emissões (kg)}$
Etapa Porto - Destino		Descarregamento do navio e posicionamento em pátio até retirada	Quantidade de TEU movimentado X Fator de Emissão (kg/TEU) = emissões (kg)
Etapa Rodoviária - Destino		Cavalo mecânico com chassi para transporte do contêiner até o destino final	$(\text{Km percorrido} / \text{Consumo (km/l)}) \times \text{Fator de Emissão (kg/l)} = \text{emissões (kg)}$

Figura 3.9 - Metodologia aplicada para cálculo do modal cabotagem porta-a-porta

Fonte: Elaborado pelo autor

Unidade de Transporte		Carreta-baú	Capacidade de carga: 27 ton Capacidade volumétrica: 100 m ³ Tara: 9 ton
Etapa Rodoviária - Origem		Cavalo mecânico para movimentar a carreta-baú até o porto	(Distância percorrida (km) / Consumo (km/l)) X Fator de Emissão (kg/l) = emissões (kg)
Etapa Porto Fluvial - Origem		Movimentação da carreta-baú entre o pátio de espera e a barça	(Distância percorrida (km) / Consumo (km/l)) X Fator de Emissão (kg/l) = emissões (kg)
Etapa Trecho Aquaviário		Transporte da carreta-baú em barça com rebocador até o porto de destino	(Distância percorrida (km) X Peso transportado (ton) X Fator de Emissão (g/t.km)) / 1000 = emissões (kg)
Etapa Porto Fluvial - Destino		Movimentação da carreta-baú da barça até o pátio de espera	(Distância percorrida (km) / Consumo (km/l)) X Fator de Emissão (kg/l) = emissões (kg)
Etapa Transporte Rodoviário - Viagem		Cavalo mecânico para movimentar a carreta-baú até o destino final	(Distância percorrida (km) / Consumo (km/l)) X Fator de Emissão (kg/l) = emissões (kg)

Figura 3.10 - Metodologia aplicada para cálculo do modo alternativo

Fonte: Elaborado pelo autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo tem por objetivo apresentar o resultado da estimativa de emissões de CO₂ para cargas gerais transportadas entre Manaus e São Paulo, através do modo de transporte cabotagem porta-a-porta e do modo alternativo, rodo-fluvial. Também apresenta uma comparação entre outras origens e destinos onde o modo alternativo é o apenas rodoviário.

A primeira parte, seção 4.1, traz a análise dos dados fornecidos pela empresa operadora de cabotagem, para um período de 31 viagens. Além da análise dos dados, nessa seção é calculado o consumo de combustível por TEU para o trecho aquaviário, que será posteriormente utilizado para calcular a emissão de CO₂ da cabotagem.

A seção seguinte (4.2) apresenta os resultados apurados para cada etapa da cabotagem porta-a-porta, utilizando os dados de consumo por TEU apurados na seção 4.1 e aplicando duas metodologias de cálculo, a baseada na energia (*energy-based approach*) e a sugerida pelo CCWG (2015). As emissões são apresentadas para cada etapa do percurso, possibilitando um melhor entendimento sobre quais etapas são as principais emissoras de CO₂.

Em seguida os resultados do modo rodo-fluvial são apresentados (seção 4.3), também desmembrados por etapa, permitindo entender quais etapas são as principais emissoras de CO₂.

Na seção seguinte (4.4) é realizada a uniformização do resultado das emissões entre os dois modais, permitindo assim a comparação entre eles. A uniformização é necessária uma vez que as unidades de cálculo de emissões são diferentes nos dois modos de transporte. Para a cabotagem é utilizado o contêiner de 20 pés (TEU) e para o rodo-fluvial a carreta-baú.

A seção 4.5 traz uma comparação entre o resultado apurado de emissões por TEU.km para o trecho aquaviário da cabotagem com dados disponíveis na literatura.

Na sequência, é apresentada uma análise de sensibilidade (seção 4.6) dos principais fatores que podem impactar os resultados das emissões, sendo: o nível de utilização dos navios; o perfil da carga; e a distância rodoviária percorrida na origem e/ou destino.

E por último, a seção 4.7 traz uma análise comparando as emissões dos dois modos de transporte para outras rotas, igualmente importantes.

4.1 Análise de dados e cálculo de consumo do trecho aquaviário da cabotagem

Essa seção apresenta uma análise dos dados de consumo e movimentação de carga em contêineres obtidos de uma empresa operadora de cabotagem, referente a 31 viagens completas, o que equivale a mais de dois anos de operação, uma vez que cada navio realiza 13,3 viagens completas por ano no serviço entre Manaus e Santos.

Através da análise desses dados é possível calcular o consumo de combustível por cada TEU transportado, sendo essa informação crucial para o cálculo das emissões totais da cabotagem porta-a-porta.

4.1.1 Dados das embarcações e do serviço de cabotagem

A empresa brasileira de navegação que forneceu os dados opera um serviço semanal entre o porto de Manaus e o porto de Itajaí, no Sul do país. Para oferecer esse serviço a empresa utiliza 3 navios próprios, cujos dados técnicos são encontrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Dados técnicos das embarcações

Navio	Ano Fabricação	Capacidade de Carga (t)	Capacidade de Carga (TEU)	Comprimento X Largura (m)
A	2008	25.888	2.500	210.54 X 29.88
B	2008	25.888	2.500	210.54 X 29.88
C	2009	25.888	2.500	210.54 X 29.88

Fonte: Marine Traffic (2017)

Os 3 navios são idênticos e foram fabricados entre 2008 e 2009. Uma viagem completa representa um ciclo de 28 dias de viagem, partindo do porto de Santos e retornando ao mesmo após o período de 4 semanas. O consumo durante uma viagem completa inclui todo o período de navegação, bem como o período em que o navio fica parado nos portos, durante sua operação de carga e descarga ou aguardando atracação.

O serviço de cabotagem operado pela empresa de cabotagem contempla a seguinte rotação e cobertura, conforme Figura 4.1.

Figura 4.1 - Trechos do serviço de cabotagem e portos atendidos

Fonte: Elaborado pelo autor

O trecho de descida inicia-se no porto de Manaus (AM), seguido pelo porto de Suape (PE), Santos (SP), chegando até o porto de Itajaí (SC). A partir daí inicia a viagem de subida, passando pelo porto de Paranaguá (PR), seguido por Itaguaí (RJ) e Suape (PE) e retornando ao porto de Manaus (AM). Cada um desses portos recebe uma escala semanal, tanto de descida como de subida.

4.1.2 Dados da movimentação de carga e consumo de combustível

A Figura 4.2 apresenta a quantidade de combustível em toneladas consumida em cada uma das 31 viagens completas. A empresa operadora realiza a medição do consumo a cada novo abastecimento, o que, de forma geral, ocorre a cada 4 semanas. A Tabela 4.2 apresenta os dados totais de consumo, quantidade de TEU e peso para cada uma das 31 viagens. Também apresenta a média de consumo e o volume médio de TEU e peso transportados.

Figura 4.2 – Consumo de combustível por viagem completa

Fonte: Elaborado pelo autor

O consumo médio apurado durante as 31 viagens é de 800 t (Tabela 4.2), embora seja possível observar na Figura 4.2 que existe grande variação no consumo para cada viagem. Essa variação é causada por diversos fatores, tais como: condições meteorológicas, de navegabilidade, tempo de espera para atracação, tempo de espera por práticos, peso total da embarcação, além do principal fator que é a velocidade de navegação. Outra causa para a variação de consumo apurada é o fato de que, nem sempre, os navios são abastecidos a cada 28 dias, podendo ser antes ou depois. Isso geralmente ocorre devido a disponibilidade de combustível nos portos, o que gera a necessidade de utilizar portos distintos e consequentemente, períodos nem sempre exatos de 28 dias. Considerando esses diversos motivos para variação no consumo apurado pelo operador de cabotagem, optou-se por apurar os dados médios de 31 viagens, de forma que esses diversos fatores pudessem ser minimizados e que o estudo possa refletir um cenário mais realista de consumo do combustível.

Tabela 4.2 - Consumo, quantidade de TEU e peso transportado

Viagem	Consumo (t)	Quantidade (TEU)	Peso Total (t)
1	802	3660	33758
2	914	4031	39326
3	766	3766	37737
4	869	3608	34547
5	746	3757	37763
6	919	3844	33985
7	879	3768	35642
8	856	3128	34521
9	747	3820	43680
10	617	3884	40092
11	711	2968	32635
12	730	3699	37568
13	850	3266	33345
14	772	3493	35220
15	1005	3361	36917
16	766	3110	32668
17	703	3569	32136
18	791	3115	28739
19	792	2703	30992
20	764	2960	30098
21	699	3596	36660
22	852	3242	35756
23	722	3446	37032
24	785	3273	37591
25	777	3110	32537
26	773	3170	33883
27	864	3497	38804
28	991	3072	38278
29	757	2755	32149
30	848	3685	38384
31	722	3709	37142
Média	800	3421	35470

Fonte: Elaborado com base nos dados da empresa de navegação

A Figura 4.3 apresenta o peso médio, em toneladas, para cada TEU carregado em cada uma das 31 viagens, para os trechos de descida e de subida. A Tabela 4.3 apresenta os detalhes de cada trecho, como quantidade movimentada

em TEU, peso total transportado e peso médio por TEU em cada viagem e para cada trecho. É possível observar que a carga de subida, ou seja, a carga que embarca nas regiões Sul e Sudeste direcionadas ao Norte e Nordeste têm um peso médio por TEU bem mais elevado (13,6 t/TEU) que a carga de descida. Isso se deve principalmente ao tipo de carga que é transportada nesse trajeto, conforme informações obtidas do operador de cabotagem, pois além de produtos alimentícios como arroz e feijão, existe uma grande quantidade de comida congelada direcionada a essas regiões. Além disso, existem grandes quantidades de material de consumo, material de construção, aço e matérias-primas em geral direcionadas à Zona Franca de Manaus. Já no trecho de descida, o perfil de cargas que embarcam é bastante diferente (7,3 t/TEU) e é composto principalmente por produtos eletrônicos, embalagens PET e motocicletas.

Figura 4.3 – Peso médio transportado em cada viagem (t/TEU)

Fonte: Elaborado com base nos dados da empresa de navegação

Tabela 4.3 - Dados por trecho – subida e descida

Viagem	Quantidade Subida (TEU)	Peso Total Subida (t)	Peso na Subida (t/TEU)	Quantidade Descida (TEU)	Peso Total Descida (t)	Peso na Descida (t/TEU)
1	1917	24284	12,7	1743	9474	5,4
2	2057	26819	13,0	1974	12507	6,3
3	1768	23261	13,2	1998	14476	7,2
4	1691	21196	12,5	1917	13351	7,0
5	1951	23750	12,2	1806	14013	7,8
6	1821	22728	12,5	2023	11257	5,6
7	1936	21122	10,9	1832	14520	7,9
8	1577	22508	14,3	1551	12013	7,7
9	1874	26978	14,4	1946	16702	8,6
10	1921	24190	12,6	1963	15902	8,1
11	1510	21297	14,1	1458	11338	7,8
12	1668	22122	13,3	2031	15446	7,6
13	1505	20925	13,9	1761	12420	7,1
14	1652	22533	13,6	1841	12687	6,9
15	1720	23637	13,7	1641	13280	8,1
16	1447	21117	14,6	1663	11551	6,9
17	1647	22136	13,4	1922	10000	5,2
18	1411	18851	13,4	1704	9888	5,8
19	1326	18259	13,8	1377	12733	9,2
20	1489	19991	13,4	1471	10107	6,9
21	1633	22809	14,0	1963	13851	7,1
22	1678	24175	14,4	1564	11581	7,4
23	1734	24210	14,0	1712	12822	7,5
24	1855	25811	13,9	1418	11780	8,3
25	1598	20769	13,0	1512	11768	7,8
26	1507	22156	14,7	1663	11727	7,1
27	1693	25656	15,2	1804	13148	7,3
28	1748	26743	15,3	1324	11535	8,7
29	1399	20486	14,6	1356	11663	8,6
30	1769	25235	14,3	1916	13149	6,9
31	1681	21786	13,0	2028	15356	7,6
Média	1683	22824	13,6	1738	12647	7,3

Fonte: Elaborado com base nos dados da empresa de navegação

O nível médio de utilização em TEU dos navios durante as 31 viagens é de 68,4%, considerando todo o período. O nível médio de utilização em peso transportado para o período é de 68,5% e o percentual de cada viagem é mostrado na Figura 4.4, considerando a capacidade do navio de 25.888 t de peso e 2.500 TEU. É possível observar nas Figuras 4.3 e 4.4 que existe uma certa variação no nível de utilização dos navios entre uma viagem e outra, tanto em TEU como em peso. Isso se deve a diversos fatores, entre eles a sazonalidade, omissão de portos por problemas técnicos ou mau tempo e concentração de volume de carga de alguns segmentos específicos, podendo ser ele de alto peso ou pouco peso.

Figura 4.4 – Nível de utilização em TEU por trecho de viagem

Fonte: Elaborado com base nos dados da empresa de navegação

Figura 4.5 – Nível de utilização em peso por trecho de viagem

Fonte: Elaborado com base nos dados da empresa de navegação

4.1.3 Cálculo do consumo de combustível por TEU transportado

Devido à quantidade de portos escalados no trecho de subida, o tempo de viagem para esse trecho é de 15 dias, enquanto o trecho de descida leva 13 dias para ser percorrido. Dessa forma, pode-se notar que o trecho de descida apresenta um consumo de combustível por TEU inferior ao trecho de subida, conforme Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Consumo de combustível por TEU para cada trecho de viagem – em kg

Consumo total médio numa viagem completa	800 t
Tempo de viagem completa	28 d
Tempo de viagem trecho descida (até Itajaí)	13 d
Tempo de viagem trecho subida (desde Itajaí)	15 d
Consumo para o trecho de descida	371 t
Consumo para o trecho de subida	429 t
Volume médio transportado na descida	1.738 TEU
Volume médio transportado na subida	1.683 TEU
Consumo por TEU na descida	213,46 kg
Consumo por TEU na subida	254,90 kg

Fonte: Elaborado pelo autor

O consumo por TEU na descida apurado é de 213,46 kg. No entanto, vale ressaltar que esse consumo considera todo o trecho de descida, desde Manaus até Itajaí. Ao considerar como porto de destino a cidade de Santos, o consumo por TEU deveria contemplar um dia a menos de viagem e, portanto, seria de apenas 197,04 kg/TEU.

O consumo por TEU utilizado no cálculo das emissões do trecho aquaviário da cabotagem porta-a-porta é de 197,04 kg/TEU, uma vez que representa um dado mais realista ao considerar o tempo de viagem entre Manaus e São Paulo, não penalizando assim o modo de transporte caso considerado o trecho de descida até Itajaí, ou simplesmente, o consumo médio durante toda a viagem completa.

4.2 Emissões da cabotagem porta-a-porta

Como mencionado na introdução deste capítulo, as emissões são estimadas para cada etapa do percurso, com o objetivo de facilitar o entendimento sobre qual etapa é a principal emissora de CO₂. Ao conhecer essa informação, espera-se que seja possível a tomada de ações específicas em busca de melhoria da eficiência e consequente redução nas emissões geradas. O detalhamento de cada etapa foi apresentado na seção 3.2.

1. Etapa rodoviária-origem

Para o cálculo desta etapa está sendo considerado um trecho de 10 km que é a distância entre o Distrito Industrial de Manaus e o porto. O cálculo é referente ao uso de um cavalo-mecânico que utiliza óleo diesel como combustível, conforme seção 3.4.1. A emissão é calculada por veículo e viagem, independentemente do tipo de contêiner que está sendo carregado, seja de 20 ou 40 pés. Esse critério é adotado pois, de forma geral, um contêiner de 20 pés é utilizado quando a carga é pesada e o de 40 pés quando a carga não é tão pesada, mas sim volumosa. Dessa

forma, o principal fator gerador de emissão é a viagem e não o tipo de contêiner que é carregado. O total de CO₂ emitido para essa etapa é de 7,66 kg.

Figura 4.6 – Emissões de CO₂ da etapa rodoviária-origem

Fonte: Elaborado pelo autor

A emissão apurada nessa etapa e apresentada na Figura 4.6 é bastante baixa uma vez que o trecho rodoviário percorrido é de apenas 10 km, gerando assim pouca emissão de CO₂.

II. Etapa porto-origem

A emissão desta etapa é medida por TEU conforme detalhado na seção 3.4.2. Nesse caso, o resultado apurado para um TEU é de 31,97 kg. A Figura 4.7 apresenta graficamente as etapas do percurso e o resultado da etapa Porto-Origem.

Figura 4.7 - Emissões de CO₂ da etapa porto-origem

Fonte: Elaborado pelo autor

III. Etapa trecho aquaviário

Essa etapa será estimada aplicando-se dois métodos de cálculo diferentes, de forma que possam ser comparados ao final e analisados para entender qual deles é o mais adequado para o cálculo das emissões totais. O primeiro método é o baseado na Energia (*energy-based approach*) uma vez que, através da análise dos dados do operador de cabotagem, é possível obter dados confiáveis de consumo por TEU. O segundo método segue a recomendação do *Clean Cargo Working Group* (BSR, 2015), pois é a adotada pelas maiores empresas globais de transporte marítimo, conforme seção 3.4.3.

Método 1 – *Energy-based approach*

No cálculo deste método é utilizada a expressão 2.2, detalhada na seção 2.4.2. O consumo de combustível utilizado é o consumo médio por TEU, para o trecho de descida, entre Manaus e Santos, conforme apurado na seção 4.1.3. A Tabela 4.5 apresenta o cálculo dessa etapa, onde a estimativa de emissões de CO₂ para um TEU transportado entre Manaus e Santos é de 628,56 kg.

Tabela 4.5 - Emissões de CO₂ entre Manaus e Santos – método Energy-based

Quantidade de TEU	1
Consumo de Combustível por TEU	197,04 kg
Fator de Emissão	3.190 kg/t ou 3,19 kg/kg
Emissão de CO ₂ por TEU entre Manaus e Santos	628,56 kg

Fonte: Elaborado pelo autor

Método 2 – CCWG

Em primeiro lugar é calculada a emissão de CO₂ por TEU.km, considerando os dados médios de consumo de viagens completas (Tabela 4.3) e de capacidade nominal dos navios em TEU (Tabela 4.1). Também utiliza o total de distância navegada numa viagem completa e os fatores de emissão recomendado pela metodologia, conforme detalhado na seção 3.4.3. O fator de ajuste relacionado ao tipo de contêiner não pôde ser aplicado uma vez que essa informação não foi

disponibilizada pelo operador de cabotagem, ou seja, não há disponibilidade da informação detalhada sobre quais contêineres são de 40' *standard* e *high cube*. Dessa forma, assume-se que todos os contêineres são *standard*. De igual forma não há informação sobre qual a quantidade de contêineres refrigerados transportados. Com isso, o cálculo assume que todos os contêineres são de carga seca. A Tabela 4.6 apresenta o cálculo e a estimativa de emissão de CO₂ por cada TEU.km.

Tabela 4.6 - Emissão de CO₂ por TEU.km – método CCWG

Consumo de Combustível	800.000 kg
Capacidade do Navio	2.500 TEU
Fator de Emissão	3.114 g/kg
Distância Navegada	12.849,18 km
CO ₂ emitido	77,552 g/TEU.km

Fonte: Elaborado com base em CCWG (2018)

Ao aplicar o fator de ajuste de utilização dos navios de 70%, conforme sugerido pela metodologia, a emissão de CO₂ por TEU.km sobe para 110,788 g. Os dados reais de utilização dos navios apurados na seção 4.1 mostram um nível médio de 68,4% em TEU e 68,5% em peso, o que significa que o nível de utilização não está muito distante do padrão utilizado nessa metodologia. A Tabela 4.7 apresenta o cálculo de emissões para o trecho entre Manaus e Santos.

Tabela 4.7 - Emissão de CO₂ entre Manaus e Santos – método CCWG

Quantidade	1 TEU
Distância Navegada	5.957,88 km
Fator de emissão	110,788 g/TEU.km
CO ₂ emitido	660,065 kg

Fonte: Elaborado pelo autor

Os dois métodos de cálculo apresentam resultados diferentes, mas não muito distantes um do outro. Enquanto o método baseado na energia estima uma emissão de 628,56 kg de CO₂ para transportar um TEU entre Manaus e Santos, o

método sugerido pelo CCWG apresenta uma estimativa de 660,065 kg, conforme Figura 4.8.

Figura 4.8 - Emissões de CO₂ do trecho aquaviário

Fonte: Elaborado pelo autor

IV. *Etapa porto-destino*

A emissão dessa etapa é medida por TEU e o fator de emissão conforme Tabela 2.18. Nesse caso, como o porto de destino é Santos, o resultado apurado para um TEU é de 16,23 kg, conforme Figura 4.9.

Figura 4.9 – Emissões de CO₂ da etapa porto-destino

Fonte: Elaborado pelo autor

V. *Etapa rodoviária-destino*

A distância considerada é de 95 km e é calculado conforme consta na seção 3.4.1. A emissão é calculada por veículo e viagem, independentemente do tipo de contêiner que está sendo carregado, seja de 20 ou 40 pés. Este critério é adotado pois, de forma geral, um contêiner de 20 pés é utilizado quando a carga é pesada e o de 40 pés quando a carga não é tão pesada, mas sim volumosa. Dessa forma,

o principal fator gerador de emissão é a viagem e não o tipo de contêiner que é carregado. O total de CO₂ emitido para essa etapa é de 72,73 kg (Figura 4.10).

Figura 4.10 – Emissões de CO₂ da etapa rodoviária-destino

Fonte: Elaborado pelo autor

Após estimar as emissões para cada etapa do transporte de cabotagem porta-a-porta, é possível obter o total de emissões geradas por um TEU transportado entre o Distrito Industrial de Manaus e a cidade de São Paulo, conforme Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Emissões de CO₂ do transporte de cabotagem para 1 TEU – em kg

Etapa	Método <i>Energy-based</i>	Método CCWG
Rodoviário-Origem	7,66	7,66
Porto-Origem	31,97	31,97
Trecho Aquaviário	628,56	660,065
Porto-Destino	16,23	16,23
Rodoviário-Destino	72,73	72,73
Emissões Totais	757,15	788,655

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 4.11 apresenta a participação de cada etapa no total das emissões geradas para um TEU, no trecho selecionado. Observa-se que o trecho aquaviário tem a maior participação no total das emissões, representando entre 83% no método baseado na energia. No método CCWG a participação é de 83,7%.

Figura 4.11 – Participação de cada etapa nas emissões da cabotagem porta-a-porta

Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Emissões do modo alternativo (Rodo-fluvial)

Assim como a seção 4.2, onde as emissões da cabotagem foram estimadas por cada etapa do transporte, o modo alternativo também é estimado por etapa do percurso. O detalhamento de cada etapa desse modo de transporta é apresentado na seção 3.3.

I. Etapa rodoviária-origem

Segue o mesmo critério de distância da modal cabotagem e é calculado conforme detalhado na seção 3.4.1. A emissão é também calculada por veículo e viagem, considerando que movimenta uma carreta-baú. O total de CO₂ emitido para essa etapa é de 7,66 kg, resultado esse igual ao apurado no modo cabotagem, conforme Figura 4.12.

Figura 4.12 – Emissões de CO₂ da etapa rodoviária-origem

Fonte: Elaborado pelo autor

II. Etapa porto fluvial-origem

Conforme detalhado na seção 3.5.2, o cálculo das emissões dessa etapa é realizado considerando o trecho rodoviário percorrido pelo cavalo-mecânico que é utilizado para realizar as manobras dentro do terminal fluvial, assumindo que cada manobra percorre no máximo 2 km. A Figura 4.13 apresenta o resultado de 1,53 kg de CO₂ para cada carreta-baú movimentada no terminal fluvial.

Figura 4.13 – Emissões de CO₂ da etapa porto fluvial-origem

Fonte: Elaborado pelo autor

III. Etapa trecho aquaviário

A distância percorrida é de 1.606 km e o fator de emissão é de 20 g/t.km, conforme detalhado na seção 3.5.3. O peso da tara de cada carreta-baú adicionada ao peso da carga é de 9 t. O peso estimado da carga transportada é de 17,3 t conforme critério de uniformização entre TEU e carreta-baú adotado. O total emitido nessa etapa é apresentado na Figura 4.14.

Figura 4.14 – Emissões de CO₂ da etapa trecho aquaviário

Fonte: Elaborado pelo autor

Na literatura internacional foram encontrados fatores de emissões por t.km em torno de 50% mais altos que o apontado pelo BNDES (2018). Por essa razão optou-se por estimar as emissões dessa etapa aplicando-se também esse fator de emissão de 31 g/t.km (MCKINNON, 2007). Com esse novo fator o total de emissões dessa etapa é de 1.309,37 kg, portanto, bem mais elevado que o cálculo anterior.

IV. *Etapa porto fluvial-destino*

O cálculo segue o mesmo critério da etapa II. A Figura 4.15 apresenta o resultado de 1,53 kg de CO₂ para cada carreta-baú movimentada no terminal fluvial.

Figura 4.15 – Emissões de CO₂ da etapa porto fluvial-destino

Fonte: Elaborado pelo autor

V. *Etapa transporte rodoviário-viagem*

Essa é a etapa final do transporte rodo-fluvial e o cálculo é detalhado na seção 3.5.4. O trecho de viagem é de 2.926 km entre Belém e São Paulo. Dada a

grande distância percorrida, essa etapa representa uma parcela importante do total de emissões do modo rodo-fluvial, conforme apresentado na Figura 4.16.

Figura 4.16 – Emissões de CO₂ da etapa rodoviária-viagem

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme Tabela 4.9, o total de emissões de CO₂ para o modo rodo-fluvial pode variar entre 3.106,1 kg e 3.560,2 kg para uma carreta-baú percorrendo o trecho entre Manaus e São Paulo. A diferença entre um resultado e outro está relacionado ao fator de emissão utilizado para o trecho aquaviário, sendo o proposto pelo BNDES menor, em comparação ao identificado na literatura internacional. Também é possível notar (Figura 4.17) que a etapa que gera maiores quantidades de emissões é a etapa rodoviária-viagem, consequência de um grande trecho rodoviário percorrido, em ambos métodos de cálculo. No entanto, aplicando o fator de emissão da literatura para o trecho aquaviário, o impacto desse trecho nas emissões totais salta de 27,5% para 36,8% do total emitido.

Tabela 4.9 – Emissões de CO₂ do transporte rodo-fluvial por carreta-baú – em kg

Etapa	Fator Emissão Barcaça BNDES – 20 g/t.km	Fator Emissão Barcaça Literatura – 31 g/t.km
Rodoviário-Origem	7,66	7,66
Porto Fluvial-Origem	1,53	1,53
Trecho Aquaviário	855,3	1.309,4
Porto Fluvial-Destino	1,53	1,53
Rodoviário-Viagem	2.240,1	2.240,1
Emissões Totais	3.106,1	3.560,2

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4.17 – Participação de cada etapa nas emissões do transporte rodo-fluvial

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 Critérios para uniformização das emissões

Nas seções 4.2 e 4.3 foram realizados os cálculos de emissões para cada um dos modos de transporte avaliados neste trabalho, tendo apurado as emissões da cabotagem por TEU e, do rodo-fluvial por carreta-baú. Considerando que a capacidade de carga em peso e volumetria são diferentes entre as duas unidades estimadas, faz-se necessário a aplicação de um critério de uniformização das emissões, de forma que possam ser comparadas as emissões entre os dois modos de transporte.

Um contêiner de 20 pés (TEU) tem capacidade para 21.760 kg e 33,3 m³ de carga, e no trecho entre Manaus e São Paulo gera entre 757 kg a 788 kg de CO₂ na cabotagem porta-a-porta, tomando-se por base os dados reais da operadora Brasileira de cabotagem, onde cada TEU teve o peso médio de 5,76 t. Uma carreta-baú tem capacidade para até 27.000 kg e 100 m³ de carga e, para o cálculo da emissões desse modo de transporte, foi estimado um peso de carga de 17.300 kg, o que equivale ao peso e capacidade volumétrica de 3 TEU. Para uma carreta-baú

transportada entre Manaus e São Paulo são emitidos entre 3.106 kg e 3.560 kg de CO₂.

Aplicando-se os ajustes propostos na Tabela 3.6 e tomando-se por base a menor emissão para cada modo de transporte, chega-se ao seguinte resultado, conforme Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Emissões de CO₂ da cabotagem após uniformização – *Energy-based* – em kg

Etapa	Emissão por TEU (kg)	Fator de Ajuste para Carreta- baú	Emissões Uniformizadas (kg)
Rodoviária-Origem	7,66	1,5	11,49
Porto-Origem	31,97	3	95,91
Trecho Aquaviário	628,56	3	1.885,68
Porto-Destino	16,23	3	48,69
Rodoviária-Destino	72,73	1,5	109,10
Total	757,1		2.150,87

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 4.10 apresenta o total de emissões de 2.150,87 kg, o que equivale ao mesmo peso e volumetria de carga transportado numa carreta-baú nessa rota. Dessa forma, é possível concluir que a cabotagem porta-a-porta emite apenas 69,2% do que é emitido pelo modo rodo-fluvial, entre Manaus e São Paulo, com um perfil de carga de 17,3 t de peso e 100 m³ de volumetria.

Ao compararmos as emissões já uniformizadas entre os dois modos de transporte, considerando os diferentes métodos de cálculo ou fatores de emissão, temos o seguinte resultado, conforme Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Emissões de CO₂ por modal com diferentes métodos e fatores de emissão – em kg

Etapa	Cabotagem (<i>Energy-based</i>)	Cabotagem (CCWG)	Rodo-fluvial (Fator Emissão do BNDES)	Rodo-fluvial (Fator Emissão da Literatura)
Rodoviária-Origem	11,49	11,49	7,66	7,66
Porto-Origem	95,91	95,91	1,53	1,53
Trecho Aquaviário	1.885,68	1.980,20	855,3	1.309,4
Porto-Destino	48,69	48,69	1,53	1,53
Rodoviária-Destino	109,10	109,10	2.240,1	2.240,1
Total	2.150,87	2.245,39	3.106,1	3.560,2

Fonte: Elaborado pelo autor

Em qualquer cenário, a cabotagem porta-a-porta apresenta um nível de eficiência maior, com resultado de emissões entre 39,6% e 27,7% inferiores ao modo alternativo, rodo-fluvial.

4.5 Comparação dos resultados apurados no trecho aquaviário da cabotagem com a literatura

Na seção 4.2.3 foram apuradas as emissões do trecho aquaviário da cabotagem utilizando dois métodos de cálculo. O primeiro, através da aplicação do método baseado na energia e utilizando os dados reais de consumo e movimentação de carga fornecidos pelo operador de cabotagem. O segundo, conforme sugestão do CCWG, que é o método utilizado pelos maiores operadores marítimos globalmente. No entanto, existem na literatura outros dados sobre emissões marítimas, e essa seção apresenta uma comparação entre o que foi apurado nessa pesquisa e a literatura, conforme Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Emissões de CO₂ para transporte marítimo/aquaviário

Autor	Emissões por TEU.km
Song (2010)	132,89 g/TEU.km
Andrade <i>et al</i> (2014)	162,4 g/TEU.km
Rodrigues (2019) Método <i>Energy-based</i>	105,5 g/TEU.km
Rodrigues (2019) Método CCWG	110,8 g/TEU.km

Fonte: Elaborado pelo autor

É possível observar que os resultados apurados nessa pesquisa através da aplicação das duas metodologias apresentam níveis de emissões inferiores a outros estudos, porém, bastante próximas uma da outra. Não é possível identificar na literatura quais fatores foram considerados pelos autores quando do cálculo das emissões, como por exemplo o período de tempo analisado, utilização dos navios, peso real dos contêineres, dentre outros fatores. Já no cálculo realizado nessa pesquisa, as informações de consumo, número de contêineres, peso da carga refletem dados reais e de um período de quase 1 ano.

4.6 Análise de sensibilidade

Essa seção apresenta uma análise de sensibilidade para alguns fatores que têm impacto direto no cálculo das emissões da cabotagem porta-a-porta, como nível de utilização dos navios, perfil da carga e distância do trecho rodoviário a ser percorrido na origem e destino.

4.6.1 Nível de utilização dos navios

Conforme apresentado na seção 4.1.2, o operador de cabotagem teve um nível médio de utilização dos navios em TEU, na descida, e durante o período de 31 viagens, de 69,5%. A metodologia CCWG assume um nível de utilização de 70% no cálculo das emissões, o que é bastante próximo do percentual real apurado. No entanto, é importante entender qual é o impacto no total das emissões da cabotagem porta-a-porta caso ocorra uma melhoria ou uma piora no nível de

utilização dos navios, permitindo entender até que ponto a cabotagem continua sendo mais eficiente que o modal alternativo. Aplicando as metodologias de cálculo utilizadas neste trabalho, as emissões da etapa trecho aquaviário são recalculadas, considerando os diferentes níveis de utilização dos navios, o que tem impacto direto no consumo de combustível por TEU transportado e, consequentemente, nas emissões por TEU.

A Tabela 4.13 apresenta as emissões por TEU para diferentes níveis de utilização para o método baseado na energia e a Tabela 4.14 para o método CCWG.

Tabela 4.13 – Emissões de CO₂ segundo o nível de utilização dos navios – método *Energy-based*

Nível de Utilização dos Navios em TEU	Emissões Trecho Aquaviário (kg)	Emissões Totais Por TEU (kg)
50%	874,0	1.002,6
60%	728,3	856,9
69,5%	628,6	757,2
80%	546,2	674,8
90%	485,6	614,2

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4.14 – Emissões de CO₂ segundo o nível de utilização dos navios – CCWG

Nível de Utilização dos Navios em TEU	Emissões Trecho Aquaviário (kg)	Emissões Totais Por TEU (kg)
50%	924,1	1.052,7
60%	770,1	898,7
70%	660,1	788,7
80%	577,3	705,9
90%	513,4	642,0

Fonte: Elaborado pelo autor

É possível observar na Tabela 4.13 que para uma queda no nível de utilização dos navios de 69,5% para 60% ocorre um aumento nas emissões totais de CO₂ por TEU de 99,7 kg, o que representa um aumento de 13,2% nas emissões. De igual forma, ocorrendo uma melhoria no nível de utilização dos navios, as

emissões por TEU reduzem 82,7 kg, representando um ganho na eficiência ambiental de 10,9%.

Para apurar o impacto que o nível de utilização tem na comparação com o modal alternativo, é necessário então realizar a uniformização das emissões e recalcular as emissões para a etapa trecho aquaviário. O resultado apurado de emissões totais para os diferentes níveis de utilização dos navios é apresentado na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Emissões totais de CO₂ da cabotagem por nível de utilização dos navios

Nível de Utilização	Método <i>Energy-based</i> (kg)	Método CCWG (kg)
50%	2.887,19	3.037,49
60%	2.450,09	2.575,49
69,5/70%	2.150,87	2.245,39
80%	1.903,79	1.997,09
90%	1.721,99	1.804,31

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4.18 encontra-se uma comparação entre as emissões totais da cabotagem porta-a-porta com o modal alternativo. No caso em estudo, mesmo que a utilização média dos navios reduza a 50%, a cabotagem continua sendo mais eficiente que o transporte rodo-fluvial entre Manaus e São Paulo. De igual forma, ocorrendo uma melhoria no nível de utilização, a cabotagem tem potencial de tornar-se ainda muito mais eficiente, podendo chegar a emitir pouco mais de 50% do que é emitido no transporte rodo-fluvial, para essa rota, com esse perfil de carga.

Figura 4.18 – Comparação das emissões de CO₂ entre os modos de transporte

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nessas análises, é possível afirmar que a cabotagem apresenta uma vantagem significativa sobre o transporte rodo-fluvial, desde que os navios que operam essa rota consigam manter um nível mínimo de utilização de 50% da capacidade em TEU. Por outro lado, existe uma oportunidade para que a cabotagem possa tornar-se mais vantajosa, em termos ambientais, ao melhorar o nível de utilização dos navios, fazendo com que o consumo por TEU transportado seja menor e, conseqüentemente, as emissões totais geradas para cada TEU transportado sejam menores.

4.6.2 Perfil da carga transportada

Conforme detalhado na seção 4.4, este estudo contempla um perfil de carga cujo peso por TEU é de 5,76 t, baseado no histórico de 31 viagens realizadas pelo operador de cabotagem. Ao utilizar esse peso por TEU, chegou-se a um critério de uniformização de 3 TEU na cabotagem para cada carreta-baú transportada nessa rota para calcular as emissões totais do trecho aquaviário da cabotagem, de forma que a capacidade total de carga seja uniforme entre os dois modos de transporte. Portanto, essa análise de sensibilidade pretende validar se, com outro perfil de carga, ocorre grande alteração nos totais de emissões de forma que a cabotagem

possa deixar de ser mais eficiente que o transporte rodo-fluvial, ou se, ao contrário, com maior peso passa a ser mais vantajosa. Para estimar as emissões com outro perfil de carga são utilizados os critérios detalhados na Tabela 3.6.

Ao estimar as emissões com um peso médio por TEU maior que os 5,76 t, outras etapas do trajeto são impactadas e não apenas o trecho aquaviário. Isso ocorre, por exemplo, na etapa rodoviária-origem quando o peso por TEU é maior que 13,5 t, uma vez que um chassi que transporta contêineres pode levar dois TEU numa viagem, mas o peso máximo para transporte não pode exceder 27 t. Dessa forma, se um TEU pesa acima de 13,5 t, ele tem que ser combinado com um outro TEU de peso inferior, para que o peso total no caminhão não ultrapasse as 27 t, ou ele tem que ser transportado sozinho, o que faz com que toda a emissão de uma viagem seja atribuída somente a um TEU, e não dois, como ocorre com cargas até 13,5 t.

A Figura 4.19 apresenta as emissões totais de cada modo de transporte assumindo pesos diferentes por TEU, uniformizados para possibilitar a comparação com carretas-baú transportando o mesmo peso.

Figura 4.19 - Emissões totais de CO₂ por peso de carga

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar a Figura 4.19 é possível notar que ocorre uma redução nas emissões totais da cabotagem em comparação ao transporte rodo-fluvial quando o peso por TEU é superior a 13,5 t. Isso ocorre porque, além das etapas rodoviária-origem e destino que para pesos inferiores necessitam 1,5 viagem para movimentar a mesma quantidade de carga que uma carreta-baú, as etapas porto-origem e destino e, também a etapa trecho aquaviário são ajustadas no momento de uniformizar as emissões entre os dois modais. Em resumo, para cada carreta-baú transportada, são necessários menos TEU quando o peso é maior que 13,5 t por TEU, considerando que a capacidade da carreta-baú é de até 27 t de peso.

O que se pode concluir dessa análise é que, para cargas mais pesadas, a cabotagem apresenta uma vantagem em termos de emissões de CO₂ ainda maior em relação ao transporte rodo-fluvial, porque as etapas que são penalizadas devido à quantidade de TEU movimentados quando o peso por TEU é mais leve, são beneficiadas à medida que, devido ao peso mais elevado, gera menos movimentação em TEU e, conseqüentemente, menos emissões.

4.6.3 Distância do trecho rodoviário na origem ou destino

Conforme pode ser observado no cálculo das emissões do transporte rodo-fluvial, a etapa rodoviária-origem e, principalmente, a etapa rodoviária-viagem têm um impacto significativo no total das emissões desse modo de transporte por causa da grande distância percorrida e do uso do diesel como combustível.

No caso da cabotagem porta-a-porta, o cálculo das emissões para a etapa rodoviária-origem e destino apresentam emissões relativamente pequenas, comparado com o total das emissões. Isso se deve ao fato de que as distâncias percorridas na origem e destino não são tão significativas. No entanto, essa seção tem por objetivo avaliar qual o raio de distância rodoviária viável entre o porto de origem ou destino da carga e o ponto de coleta ou entrega da mesma, de forma a cabotagem porta-a-porta continue apresentando um total de emissões menor que o transporte rodo-fluvial. Para isso assumimos o mesmo perfil de carga, partindo do mesmo ponto de origem em Manaus, com destino a três cidades importantes

por sua característica industrial e comercial. As três cidades selecionadas são Ribeirão Preto, localizada a 430 km do porto de Santos, Belo Horizonte que fica a 670 km e Goiânia, cuja distância do porto de Santos é de 1.017km. As três cidades são atendidas pelo porto de Santos pois este é o faz parte do serviço regular e está mais próximo dessas cidades.

À medida que aumenta a distância entre o porto de Santos e o destino final, no caso da cabotagem porta-a-porta, é possível que a distância entre o porto fluvial de Belém e o destino final reduza para o transporte rodo-fluvial. Portanto, para que seja feita uma comparação adequada desses novos trechos, é necessário recalcular as emissões totais para os dois modos de transporte.

A Figura 4.20 demonstra a distância rodoviária a ser percorrida em cada um dos modais à medida que o destino final é alterado.

Figura 4.20 - Distância rodoviária no destino para cada modo de transporte

Fonte: Elaborado pelo autor

As Tabelas 4.16 e 4.17 apresentam o cálculo revisado para a cabotagem porta-a-porta considerando os novos destinos de carga, para cada método de cálculo.

Tabela 4.16 - Emissões totais de CO₂ da cabotagem por destino de carga – *Energy-based* – em kg

Destino	São Paulo	Ribeirão Preto	Belo Horizonte	Goiânia
Etapa				
Rodoviária-origem	11,49	11,49	11,49	11,49
Porto-Origem	95,91	95,91	95,91	95,91
Trecho Aquaviário	1.885,68	1.885,68	1.885,68	1.885,68
Porto-Destino	48,69	48,69	48,69	48,69
Rodoviária-Destino	109,10	493,80	769,42	1.167,90
Total	2.150,87	2.535,57	2.811,19	3.209,67

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4.17 - Emissões totais de CO₂ da cabotagem por destino de carga – CCWG – em kg

Destino	São Paulo	Ribeirão Preto	Belo Horizonte	Goiânia
Etapa				
Rodoviária-origem	11,49	11,49	11,49	11,49
Porto-Origem	95,91	95,91	95,91	95,91
Trecho Aquaviário	1.980,20	1.980,20	1.980,20	1.980,20
Porto-Destino	48,69	48,69	48,69	48,69
Rodoviária-Destino	109,10	493,80	769,42	1.167,90
Total	2.245,39	2.630,09	2.905,71	3.304,19

Fonte: Elaborado pelo autor

O transporte rodo-fluvial também é recalculado para cada método de cálculo (fator de emissão das barcaças) considerando as novas distâncias da etapa rodoviária-viagem e o resultado é apresentado nas Tabelas 4.18 e 4.19.

Tabela 4.18 – Emissões de CO₂ do transporte rodo-fluvial por destino de carga – BNDES – em kg

Destino	São Paulo	Ribeirão Preto	Belo Horizonte	Goiânia
Etapa				
Rodoviária-origem	7,66	7,66	7,66	7,66
Porto Fluvial-Origem	1,53	1,53	1,53	1,53
Trecho Aquaviário	855,3	855,3	855,3	855,3
Porto Fluvial-Destino	1,53	1,53	1,53	1,53
Rodoviária-Viagem	2.240,1	1.975,98	2.062,49	1.518,16
Total	3.106,1	2.841,98	2.928,49	2.384,16

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4.19 – Emissões de CO₂ do transporte rodo-fluvial por destino de carga – Literatura – em kg

Destino	São Paulo	Ribeirão Preto	Belo Horizonte	Goiânia
Etapas				
Rodoviária-origem	7,66	7,66	7,66	7,66
Porto Fluvial-Origem	1,53	1,53	1,53	1,53
Trecho Aquaviário	1.309,4	1.309,4	1.309,4	1.309,4
Porto Fluvial-Destino	1,53	1,53	1,53	1,53
Rodoviária-Viagem	2.240,1	1.975,98	2.062,49	1.518,16
Total	3.560,2	3.296,08	3.382,59	2.838,26

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao comparar as emissões totais para o destino Ribeirão Preto, a cabotagem apresenta clara vantagem em relação aos dois métodos de cálculo do transporte rodo-fluvial, sendo mais evidente a vantagem quando comparado às emissões calculadas utilizando os dados de emissões das barcaças para o trecho aquaviário sugerido pela literatura internacional. Quando comparado ao método cujas emissões são bem menores no trecho aquaviário (método BNDES), a vantagem é bem menor, conforme Figura 4.21. Para o destino Belo Horizonte, localizado a 670 km do porto de Santos, existe vantagem da cabotagem apenas quando comparada ao método baseado na literatura. Para o destino Goiânia, uma vez que está mais localizada praticamente na rota rodoviária entre Belém e São Paulo, existe clara desvantagem da cabotagem, já que a distância entre o porto fluvial de Belém e o destino fica cada vez menor, aumentando em muito as emissões da etapa rodoviária-destino da cabotagem.

Dessa forma, é possível perceber que para destinos localizados a distâncias superiores a 700 km e ao Norte do porto de Santos, o impacto da etapa rodoviária-destino no cálculo das emissões da cabotagem é bastante significativo, fazendo com que a cabotagem seja menos eficiente em termos de emissões de CO₂ em relação ao modo alternativo, rodo-fluvial.

Figura 4.21 - Comparação das emissões de CO₂ por destino de carga

Fonte: Elaborado pelo autor

4.7 Emissões para outras rotas de transporte

Com o propósito de validar a vantagem da cabotagem porta-a-porta sobre o transporte rodo-fluvial, optou-se por comparar as emissões entre os dois modos de transporte também para outras rotas importantes. Como o Nordeste brasileiro é um grande mercado consumidor dos produtos produzidos no Sul e Sudeste do país, além de receber um grande volume de produtos produzidos na Zona Franca de Manaus, é interessante entender se a cabotagem apresenta também vantagem sobre o transporte alternativo, nesse caso o puramente rodoviário, também com cargas destinadas a essa região do Brasil.

Importante ressaltar que, com base no histórico de 31 viagens realizadas pelo operador de cabotagem (Tabela 4.4), o perfil de carga transportada entre o Sul/Sudeste do Brasil e a região Norte/Nordeste é bastante distinta ao perfil da carga de descida, com origem em Manaus. O peso médio por TEU é de 13,6 t, o nível de utilização do navio em TEU é de 67,3% e em peso é de 88,2%. Os critérios para uniformização das emissões entre os dois modos de transporte devem ser

diferentes dos critérios usados para a rota entre Manaus e São Paulo, devido a diferença de perfil da carga, e está discriminado na Tabela 4.20. Ressaltando que o processo de uniformização é necessário para que seja possível a comparação entre os modos de transporte, uma vez que o contêiner de 20 pés (TEU) tem capacidade em peso e volumetria de carga menor que uma carreta-baú.

Tabela 4.20 - Critério de uniformização entre TEU e carreta-baú

Peso por TEU (t)	Quantidade considerada para uniformização da Etapa Rodoviária Origem e Destino	Quantidade considerada para uniformização da Etapa Porto Origem/ Destino e Trecho Aquaviário
5,0	1,5 Viagem	3 TEU
10,0	1,5 Viagem	3 TEU
13,6	1 Viagem	2 TEU
15,0	1 Viagem	2 TEU
20,0	1 Viagem	2 TEU
21,760	1 Viagem	2 TEU

Fonte: Elaborado pelo autor

Como uma carreta-baú tem capacidade para transportar até 27 t de carga, são necessários 2 TEU para movimentar a mesma carga e, portanto, para efeito de cálculo das emissões das etapas porto-origem e destino, e da etapa trecho aquaviário, 2 TEU são computados. Já para as etapas rodoviárias origem e destino, apenas 1 viagem é computada uma vez que um chassi pode transportar até 27 t e acomodar 2 TEU.

Foram selecionadas 3 rotas de subida e 1 rota de descida para realizar a comparação. As rotas selecionadas são:

- Rota 1 – São Paulo para Recife
- Rota 2 – Manaus para Recife
- Rota 3 – São Paulo para Fortaleza
- Rota 4 – Porto Alegre para Recife

Para simplificar o cálculo e a comparação entre os modos de transporte nessas rotas, apenas o método sugerido pelo CCWG é utilizado para a cabotagem e apenas o método sugerido pela literatura internacional (emissões das barcas) para o transporte alternativo, no caso, rodo-fluvial para a rota Manaus – Recife e puramente rodoviário para as demais rotas.

A Tabela 4.21 apresenta o cálculo das emissões da cabotagem porta-a-porta para cada rota e por TEU. Para a origem São Paulo o porto-origem é Santos localizado a 95 km de distância. No caso de Porto Alegre, o porto mais próximo e parte do serviço é Itajaí, que está localizado a 535 km de distância. A origem da carga de Manaus considera o trecho rodoviário de 10 km entre o Distrito Industrial e o porto. No destino, Recife é atendido pelo porto de Suape que está localizado a 50,9 km. Fortaleza é atendida por Pecém, que fica a 53,8 km de distância.

Tabela 4.21 – Emissões de CO₂ da cabotagem por TEU – em kg

Rotas Etapa	Critérios de Cálculo	Rota 1 São Paulo - Recife	Rota 2* Manaus - Recife	Rota 3 São Paulo - Fortaleza	Rota 4** Porto Alegre - Recife
Rodoviária- origem	Fator emissão 2,603 kg/l Distância São Paulo 95 km; Porto Alegre 535 km; Manaus 10 km Consumo 3,4 km/l	72,70	7,66	72,70	409,59
Porto-Origem	16,23 kg/TEU 31,97 kg/TEU* 30,37 kg/TEU**	16,23	31,97	16,23	30,37
Trecho Aquaviário	110,788 g/TEU.km Distância: Santos- Suape 2042 km; Santos-Pecém 2737,6 km; Manaus-Suape 3185,6 km Itajaí-Suape 2289,6 km	226,23	352,93	303,29	253,66
Porto-Destino	31,97 kg/TEU	31,97	31,97	31,97	31,97
Rodoviária- Destino	Distância Recife 50,9 km; Fortaleza 53,8 km	38,97	38,97	41,19	38,97
Total		386,10	463,50	465,38	764,56

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 4.22 apresenta as emissões da cabotagem porta-a-porta após a uniformização das emissões.

Tabela 4.22 - Emissões totais uniformizadas de CO₂ da cabotagem por rota – em kg

Rota	Rota 1	Rota 2	Rota 3	Rota 4
	São Paulo -	Manaus -	São Paulo -	Porto Alegre -
Etapas	Recife	Recife	Fortaleza	Recife
Rodoviária-Origem	72,70	11,49	72,70	409,59
Porto-Origem	32,46	95,91	32,46	60,74
Trecho Aquaviário	452,46	1.058,79	606,58	507,32
Porto-Destino	63,94	95,91	63,94	63,94
Rodoviária-Destino	38,97	58,46	41,19	38,97
Total	660,53	1.320,56	816,87	1.080,56

Fonte: Elaborado pelo autor

O modal alternativo para as rotas entre o Sul e Sudeste até o Nordeste é puramente rodoviário, não havendo nenhuma etapa que inclua trecho aquaviário ou porto fluvial. A distância rodoviária entre São Paulo e Recife é de 2.702 km, de São Paulo a Fortaleza é de 2.983 km e de Porto Alegre a Recife é de 3.839 km. A única rota que inclui todas as etapas é Manaus a Recife e o percurso rodoviário entre Belém e Recife é de 2.034 km. O cálculo do modo alternativo é realizado por carreta-baú e é apresentado na Tabela 4.23.

Tabela 4.23 - Emissões totais de CO₂ do modo alternativo por rota – em kg

Rota	Rota 1	Rota 2	Rota 3	Rota 4
	São Paulo -	Manaus -	São Paulo -	Porto Alegre -
Etapas	Recife	Recife	Fortaleza	Recife
Rodoviária-Origem		7,66		
Porto Fluvial-Origem		1,53		
Trecho Aquaviário		1.309,40		
Porto Fluvial-Destino		1,53		
Rodoviária-Viagem	2.068,62	1.557,21	2.283,75	2.939,09
Total	2.068,62	2.877,33	2.283,75	2.939,09

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 4.22 destaca claramente a vantagem que a cabotagem porta-a-porta apresenta nessas rotas. Mesmo na rota entre Porto Alegre e Recife, onde existe um trecho rodoviário de 535 km na origem, a cabotagem apresenta emissões muito inferiores ao modo rodoviário. Isto se deve ao fato de que o modo rodoviário

tem que percorrer um trajeto por estradas muito grande, com distâncias superiores a 2.000 km, demandando um alto consumo de combustível e, conseqüentemente, gerando volumes elevados de emissões de CO₂. A diferença no total de emissões na rota entre São Paulo e Recife é bastante relevante, onde a cabotagem porta-a-porta emite menos que um terço do modo rodoviário.

Figura 4.22 – Emissões de CO₂ por modo de transporte e rota

Fonte: Elaboração própria

4.8 Limitações das Estimativas

O método proposto pelo CCWG (BSR, 2015) utiliza o consumo total de uma viagem completa dividido pela capacidade do navio e multiplicado pela distância navegada para apurar o fator de emissão por TEU.km. Dessa forma, ao calcular a emissão para trechos aquaviários específicos, faz-se necessário apenas multiplicar o fator de emissão por TEU.km pela distância navegada. No entanto, o que o método não considera quando calcula as emissões por trechos específicos é o nível de utilização daquele trecho em diante na viagem. Dessa forma, caso a viagem de um navio siga sem que haja o mesmo volume de contêineres a bordo, seria necessário recalcular o fator de emissão tomando em conta o novo nível de utilização do navio. Caso contrário, os contêineres que seguem a bordo estariam

assumindo um nível de emissões menor do que o que realmente está sendo gerado para cada um deles.

Existem critérios de custo/frete, frequência e tempo de viagem (e sua variância) que impactam a decisão do embarcador na escolha do modal de transporte. Portanto, o fator ambiental, tema deste estudo, não é o único considerado na decisão de qual modal utilizar.

O consumo de diesel no transporte rodoviário foi selecionado com base nos dados fornecidos pelo Ministério do Meio Ambiente. No entanto, existem diversos fatores que podem impactar diretamente o consumo. A qualidade do rolamento da rodovia, o seu traçado em termos de geometria horizontal e vertical, o peso total transportado, a idade dos veículos, a qualidade do combustível, dentre outros fatores; podem aumentar significativamente o consumo em determinados trechos.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo é dedicado às conclusões obtidas ao longo desta dissertação, e traz considerações sobre a revisão da literatura, os métodos de cálculo utilizados e os resultados apurados. Também apresenta recomendações para trabalhos futuros.

5.1 Revisão bibliográfica

Ao realizar a revisão da bibliografia existente, observou-se que existe vasta disponibilidade de estudos sobre as emissões marítimas, onde as diversas metodologias de cálculo são avaliadas e, que de forma geral, destacam a grande vantagem desse modo de transporte em termos de emissões de CO₂, em comparação com o modo rodoviário. Também observou-se que, praticamente todas as metodologias seguem as diretrizes do IPCC (2006) para o cálculo das emissões.

Identificou-se também estudos sobre as emissões no transporte fluvial por barcas, emissões em terminais portuários para operação com contêineres e emissões rodoviárias. Poucos estudos foram encontrados sobre transporte intermodal, combinando o transporte marítimo com o transporte rodoviário.

No entanto, não foram identificados na literatura estudos que comparassem as emissões entre os modais marítimo e rodoviário tomando-se em consideração as etapas intermediárias do percurso, como por exemplo as emissões geradas nos terminais portuários. Os estudos disponíveis trazem as emissões a partir do momento que a carga marítima está no porto e inicia a viagem de navio até o porto de destino. Os estudos encontrados não incluem no cálculo de emissões totais o trecho rodoviário na origem e destino.

Dessa forma, acredita-se que este trabalho, ao incluir todas as etapas do percurso, apresenta uma comparação entre os modos de transporte muito mais precisa e completa que a disponível na literatura.

5.2 Método de cálculo

Para este estudo, optou-se por aplicar o método baseado na energia (*energy-based approach*) (HJELLE, 2009; MIOLA; MARRA; CIUFFO, 2011) para o cálculo das emissões da cabotagem. Esse método é o mais indicado quando uma empresa quer medir as emissões diretas de sua operação. É um método simples, mas bastante preciso, sempre que as informações de consumo estão disponíveis. Buscando uma validação dos resultados apurados através do método baseado na energia, utilizou-se também o método sugerido pelo *Cargo Clean Working Group* (CCWG) (BSR, 2015) para realizar o cálculo das emissões do trecho aquaviário da cabotagem. Os resultados apurados das emissões de CO₂ através de ambos métodos foram bastante próximos, 105,5 e 110,8 g/t.km (Tabela 4.15). No entanto, quando comparado com dados de emissões encontrados na literatura (ANDRADE *et al.*, 2014; SONG, 2010), existe uma diferença entre 21% e 35% a menos nas emissões apuradas neste estudo utilizando os dados reais de consumo durante 31 viagens do operador Brasileiro de cabotagem.

Para o modo rodo-fluvial, as etapas foram calculadas também utilizando o método baseado na energia, através da aplicação de fatores de emissão amplamente utilizados em diversos estudos nacionais e internacionais. No entanto, para a etapa de trecho aquaviário, onde o transporte por barcaças é utilizado, optou-se por calcular as emissões com dois fatores de emissão distintos. O primeiro deles reflete uma análise realizada no transporte por barcaças no Brasil e apresenta um fator de emissão menor, de 20 g/t.km (BNDES, 2018). Já o segundo fator utilizado é baseado na literatura internacional, que apresenta um fator de 31 g/t.km (MCKINNON, 2007).

Um problema chave para a comparação entre os modos de transporte é a necessidade de uniformizar o resultado das emissões. O fato de que a emissão total da cabotagem é calculada por TEU transportado, e a capacidade de carga em peso e volumetria é bem inferior à capacidade de carga de uma carreta-baú, utilizada no transporte rodo-fluvial, faz com que um critério de uniformização das emissões seja necessário. Os critérios adotados para uniformizar as emissões da cabotagem por TEU para o equivalente ao emitido por uma carreta-baú, foram definidos para cada etapa do percurso e baseados na atividade necessária em cada etapa para movimentar a mesma quantidade de carga, em peso ou volumetria, de acordo com o perfil da carga. Acredita-se que os critérios de uniformização utilizados representam uma equiparação adequada entre os modos de transporte.

5.3 Resultados apurados

A rota principal, foco deste trabalho, é o transporte entre Manaus e São Paulo, de cargas em contêiner, com serviço porta-a-porta, o que inclui todo o trajeto desde a retirada da carga da fábrica ou armazém do embarcador até a entrega da carga ao destinatário final. Através da aplicação dos métodos já mencionados na seção 5.2, é possível afirmar que, com o perfil de carga analisado de 5,76 t por TEU e 17,3 t de carga por carreta-baú, a cabotagem porta-a-porta mostra-se mais eficiente que o modo rodo-fluvial na rota entre Manaus e São Paulo. A cabotagem porta-a-porta emite entre 2.150,87 kg e 2.245,39 kg de CO₂, dependendo do método de cálculo utilizado (*Energy-based* ou CCWG) e o modo rodo-fluvial emite entre 3.106,1 kg e 3.560,2 kg (BNDES ou Literatura), de acordo com o método utilizado na emissão do trecho aquaviário das barcaças. Independentemente do método de cálculo, a cabotagem emite bem menos CO₂ que o modo rodo-fluvial, algo entre 30% e 40%.

Este resultado apresenta um percentual de redução menor do que o encontrado em alguns estudos realizados em Taiwan, onde o transporte intermodal combinando marítimo e rodoviário apresentou redução de 60,3% versus o puramente rodoviário (LIAO; TSENG; LU, 2009); e 86,5% (LEE; HU; CHEN, 2010).

Um outro estudo realizado no Brasil apurou uma vantagem de quase 90% da cabotagem versus o transporte rodoviário, quando comparando as emissões em g/t.km (ANDRADE et al., 2014). Acredita-se que a principal razão pela vantagem de apenas 30% a 40% é o fato de que a comparação é entre dois modos de transporte intermodais, a cabotagem porta-a-porta que contempla trechos rodoviários, aquaviários e marítimos; com o rodo-fluvial, que possui trechos rodoviários e aquaviários. Dessa forma, o modo rodo-fluvial já se beneficia da combinação com outro modal ambientalmente mais eficiente, o que faz com que o resultado final apresente uma vantagem da cabotagem, mas não tão grande como se todo o modo alternativo fosse puramente rodoviário. Além disso, neste estudo estão incluídas as demais etapas do percurso, o que não foi contemplado nos outros estudos. Este entendimento pode ser validado quando se analisa o comparativo das emissões entre os modais para outras rotas de transporte.

A análise de sensibilidade destaca alguns fatores importantes nas emissões da cabotagem porta-a-porta, e busca sinalizar pontos críticos e que devem ser observados para garantir a eficiência da cabotagem sobre o rodo-fluvial. Um desses fatores é o nível de utilização dos navios e, desde que o nível médio se mantenha acima de 50% (Figura 4.17), a cabotagem segue sendo mais eficiente. Outro fator é o perfil da carga e, nesse caso, quando o peso médio por TEU ultrapassa 13,5 t, a emissão total da cabotagem porta-a-porta já uniformizada é menor, entre 53% e 60% (Figura 4.18), o que aumenta a vantagem em relação ao rodo-fluvial. O último fator é a distância rodoviária na origem e/ou destino. Dos três destinos avaliados, apenas Goiânia apresenta emissões maiores para a cabotagem que o rodo-fluvial. A razão é a localização de Goiânia e a distância rodoviária desde o porto de Santos. O que se pode concluir dessa análise é que, para destinos localizados a mais de 700 km de distância do porto e, ao Norte de Santos, a cabotagem gera mais emissões que o rodo-fluvial (Figura 4.20). Isso acontece porque à medida que o destino fica mais ao Norte, a distância rodoviária percorrida pelo modo rodo-fluvial diminui, o que reduz o total de emissões desse modo de transporte, enquanto aumenta significativamente as emissões da etapa rodoviária da cabotagem.

Por último temos a comparação entre a cabotagem porta-a-porta e o modo alternativo para outras rotas de transporte. Ao comparar as emissões da rota 1, entre São Paulo e Recife, onde o modo alternativo é o puramente rodoviário, é possível observar que a cabotagem emite 68% menos CO₂ que o modo alternativo. De igual forma, as demais rotas comparadas (Figura 4.21) apresentam reduções entre 63% e 69%. Este nível de eficiência é mais próximo ao apurado no estudo realizado em Taiwan (LIAO; TSENG; LU, 2009).

5.4 Sugestões para trabalhos futuros

Esta seção aborda algumas possibilidades para trabalhos futuros. Importante comentar que existem poucos trabalhos ligados à logística de baixo carbono no Brasil e, portanto, novos estudos podem contribuir para um melhor entendimento desse tema.

Com relação ao estudo aqui elaborado, as emissões no transporte fluvial estão baseadas em alguns estudos internacionais e poucos estudos brasileiros sobre o tema foram identificados. No entanto, o que foi encontrado é focado nos comboios hidroviários de grãos e não no transporte de barcas Ro-Ro (roll-on/roll-off) que transportam carretas-baú em rios. Claramente existe nessa área oportunidade para um estudo mais profundo do nível de consumo e emissões, tomando-se por base os tipos de equipamentos e os perfis de cargas transportados pelos rios brasileiros.

Outra área de oportunidade para futuros estudos é em relação às emissões dos terminais portuários, tanto de barcas quanto de contêineres. Apenas os dados de um operador portuário brasileiro de contêineres foram identificados na literatura, o que certamente, deixa uma oportunidade clara para estudo. Outro fator importante é que no Brasil existem grandes diferenças de tamanho, volume, tipo de equipamento e qualidade da mão-de-obra entre os diferentes terminais portuários, o que poderia gerar níveis bastante distintos de emissões entre os terminais.

Com relação às emissões aquaviárias da cabotagem, este estudo foi elaborado com base em dados reais de consumo de navios de 2.500 TEU de capacidade. Novos estudos seriam importantes considerando que já existem navios de 3.800 a 4.800 TEU de capacidade operando na cabotagem brasileira. O entendimento do nível de emissões gerados por esses navios maiores poderia validar este estudo ou apresentar fatores adicionais a serem considerados.

Como este estudo foca as emissões apenas de CO₂, seria interessante apurar os níveis de emissões de MP₁₀ e SO₂ para avaliar o benefício total ambiental da cabotagem.

A proposta de mecanismos de compensação e uma análise econômica-ambiental também trariam benefício para o entendimento da vantagem que o modal cabotagem apresenta em relação ao modal alternativo.

Por último, este estudo desconsiderou as emissões geradas para posicionamento de contêineres vazios e de carretas-baú vazias. Embora a regra aplicada neste estudo tenha sido igual para os dois tipos de equipamento e modais, seria bastante interessante conhecer o impacto nas emissões totais de cada modal ao considerarmos também as emissões adicionais para reposicionamento desses equipamentos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAC. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS ARMADORES DE CABOTAGEM (ABAC)**. Disponível em: <www.abac.org.br>. Acesso em: 23 out. 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (ANTAQ). **Raio-X da Frota Brasileira na Navegação de Cabotagem**. Disponível em: <<http://portal.antaq.gov.br/wp-content/uploads/2017/03/Raio-X-da-Frota-Brasileira-na-Cabotagem-Dezembro-de-2010.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (ANTAQ). **AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (ANTAQ)**. Disponível em: <www.antaq.gov.br>. Acesso em: 13 jun. 2014.

ANDRADE, A. L. C.; MATTEI, L. **Consumo Energético e Emissões de CO₂: uma Análise do Setor de Transportes Brasileiro**. ANPEC. **Anais...2011** Disponível em: <<http://anpec.org.br/encontro/2011/inscricao/arquivos/cec.pdf>>

ANDRADE, P. et al. **Potencial de Redução da Emissão de GEE através de Intermodalidade no Corredor de Carga Geral Manaus-Santos**. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, XXVIII, 2014, S.I. **Anais...2014** Disponível em: <<http://www.producao.usp.br/handle/BDPI/48615>>

BERTOLINI, T. **Navegando com a Bertolini**. Disponível em: <www.tbl.com.br>. Acesso em: 12 mar. 2018.

Blog da Floresta. Disponível em: <www.blogdafloresta.com.br>. Acesso em: 13 abr. 2017.

BNDES. **NAVEGAÇÃO INTERIOR BRASILEIRA BRAZILIAN INLAND NAVIGATION**. Disponível em: <www.bndes.gov.br>. Acesso em: 15 jun. 2018.

BOUZAS, J. S. S. **Modelagem da Remoção de SO₂ numa Torre de Nebulização usando solução de Hidróxido de Sódio**. [s.l.] UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2016.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **PAS 2050 : 2011 Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services**. Disponível em: <www.bsigroup.com>. Acesso em: 5 jul. 2013.

BSR. **Clean Cargo Working Group Carbon Emissions Accounting Methodology**. Disponível em: <www.bsr.org>. Acesso em: 10 out. 2017.

BUREAU OF TRANSPORTATION STATISTICS. **Transportation Statistics Annual Report 2016**. Disponível em: <<https://www.bts.gov/newsroom/transportation-statistics-annual-report-2016-released>>. Acesso em: 12 nov. 2017.

Cartão Caminhoneiro. Disponível em: <www.cartaocaminhoneiro.com.br>. Acesso em: 13 abr. 2017.

CCS. **CCS Annual Report 2017**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <www.ccs.org.cn>.

CETESB. **Emissões Veiculares no Estado de São Paulo - 2015**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2017/11/emissoesveiculares_09_nov.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2017.

CETESB; ALVES, J. W. S.; GONZALEZ, J. T. V. F. M. P. **Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2014/01/Primeiro_Inventario_GEE_WEB_Segunda-Edicao-v1.pdf>. Acesso em: 14 maio. 2015.

CISNEROS, J.; BRINATI, H. Redução dos impactos ambientais causados pelo transporte marítimo. **CONGRESSO PANAMERICANO DE ...**, 2009.

CNT. **CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES (CNT)**. Disponível em: <www.cnt.gov.br>. Acesso em: 15 jul. 2016.

CNT. **Anuário CNT do Transporte**. Disponível em: <<http://anuariodotransporte.cnt.org.br/2017/>>. Acesso em: 17 jul. 2018.

COOPER, D. Exhaust emissions from ships at berth. **Atmospheric Environment**, v. 37, n. 27, p. 3817–3830, set. 2003.

CORBETT, J. J.; FISCHBECK, P. S. Emissions from Waterborne Commerce Vessels in United States Continental and Inland Waterways. **Environmental Science & Technology**, v. 34, n. 15, p. 3254–3260, ago. 2000.

CORBETT, J. J.; FISCHBECK, P. S.; PANDIS, S. N. Global nitrogen and sulfur inventories for oceangoing ships. v. 104, p. 3457–3470, 1999.

CORBETT, J. J.; KOEHLER, H. W. Updated emissions from ocean shipping.

Journal of Geophysical Research, v. 108, n. D20, p. 4650, 2003.

CORBETT, J. J.; KOEHLER, H. W. Considering alternative input parameters in an activity-based ship fuel consumption and emissions model: Reply to comment by Øyvind Endresen et al. on “Updated emissions from ocean shipping”. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, n. D23, p. D23303, 2004.

CORBETT, J. J.; WANG, H.; WINEBRAKE, J. J. The effectiveness and costs of speed reductions on emissions from international shipping. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 14, n. 8, p. 593–598, dez. 2009.

CRAIG, A. J. **Measuring Supply Chain Carbon Efficiency: A Carbon Label Framework**. [s.l.] Massachusetts Institute of Technology, 2012.

DALSØREN, S. B. et al. Update on emissions and environmental impacts from the international fleet of ships. The contribution from major ship types and ports. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, v. 8, n. 5, p. 18323–18384, 21 out. 2008.

DE MEYER, P.; MAES, F.; VOLCKAERT, A. Emissions from international shipping in the Belgian part of the North Sea and the Belgian seaports. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 1, p. 196–206, jan. 2008.

DENIZ, C.; DURMUŞOĞLU, Y. Estimating shipping emissions in the region of the Sea of Marmara, Turkey. **The Science of the total environment**, v. 390, n. 1, p. 255–61, 1 fev. 2008.

EEA. **EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013: Technical guidance to prepare national emission inventories**. Disponível em: <<http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>>. Acesso em: 16 jun. 2015.

ENDRESEN, Ø. et al. Improved modelling of ship SO₂ emissions—a fuel-based approach. **Atmospheric Environment**, v. 39, n. 20, p. 3621–3628, jun. 2005.

ENDRESEN, Ø. et al. A historical reconstruction of ships’ fuel consumption and emissions. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, n. D12, p. D12301, 16 jun. 2007.

ENDRESEN, Ø.; SØRGA, E. Emission from international sea transportation and environmental impact. v. 108, 2003.

EUROPEAN CHEMICAL INDUSTRY COUNCIL. **Guidelines for Measuring**

and Managing CO2 Emission from Freight Transport Operations. Disponível em: <<http://www.cefic.org/Documents/IndustrySupport/Transport-and-Logistics/Best Practice Guidelines - General Guidelines/Cefic-ECTA Guidelines for measuring and managing CO2 emissions from transport operations Final 30.03.2011.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2015.

EUROSTAT. Freight transport statistics - modal split. **Eurostat - Statistics explained**, n. May 2017, 2016.

EYRING, V. et al. Emissions from international shipping: 1. The last 50 years. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, n. D17, p. D17305, 2005.

EYRING, V.; ISAKSEN, I.; BERNTSEN, T. Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping. **Atmospheric ...**, v. 44, n. 37, p. 4735–4771, 2010.

GEERLINGS, H.; VAN DUIN, R. A new method for assessing CO2-emissions from container terminals: A promising approach applied in Rotterdam. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 6–7, p. 657–666, 2011.

GHG PROTOCOL. **Protocolo de Gases de Efeito de Estufa**. [s.l: s.n.].

Grupo Chibatão. Disponível em: <www.grupochibatao.com.br>. Acesso em: 13 abr. 2017.

HJELLE, H. M. Transport Reviews : A Transnational Short Sea Shipping ' s Green Label at Risk. n. September 2013, p. 37–41, 2009.

HJELLE, H. M.; FRIDELL, E. When is Short Sea Shipping Environmentally Competitive ? **Environmental Health**, 2012.

ILOS. Disponível em: <www.ilos.com.br/web/tag/matriz-de-transportes/>. Acesso em: 16 fev. 2019.

IMO. Climate Change and the Maritime Industry IMO. p. 1–95, 2010.

INTERGOVERNMENTAL PANEL FOR CLIMATE CHANGE (IPCC). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. **Institute for Global Environmental Strategies**, ..., p. 1–24, 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL FOR CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2007 : An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Disponível em: <www.ipcc.ch>. Acesso em: 16 abr. 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL FOR CLIMATE CHANGE (IPCC). **Working Group III contribution to the IPCC 5th Assessment Report “Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change”**. Disponível em: <www.ipcc.ch>.

Acesso em: 12 abr. 2014.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **IMO GHG Study 2009**. Disponível em: <<http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/SecondIMOIGHGStudy2009.pdf>>. Acesso em: 12 maio. 2014.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2016.

JONES, W. BRAD; CASSADY, C. RICHARD; BOWDEN JR, R. O. Developing a Standard Definition of Intermodal Transportation. **Transportation Law Journal**, v. 27, p. 345–352, 2000.

LEE, P. T. -W.; HU, K.; CHEN, T. External Costs of Domestic Container Transportation: Short-Sea Shipping versus Trucking in Taiwan. **Transport Reviews**, v. 30, n. 3, p. 315–335, maio 2010.

LIAO, C.-H.; TSENG, P.-H.; LU, C.-S. Comparing carbon dioxide emissions of trucking and intermodal container transport in Taiwan. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 14, n. 7, p. 493–496, out. 2009.

Liebherr. Disponível em: <www.liebherr.com>. Acesso em: 13 abr. 2017.

Loja Hobby Zone. Disponível em: <www.lojahobbyzone.com.br>. Acesso em: 13 abr. 2017.

MCKINNON, A. CO2 Emissions from Freight Transport: An Analysis of UK Data. n. iii, 2007.

MCKINNON, A. LogForum. **Electronic Scientific Journal of Logistics**, v. 6, p. 1–9, 2010.

MEDINA ET AL. **Proposição de Rede de Transportes Intermodal utilizando Terminais Marítimos de Cabotagem**. [s.l: s.n.].

Mercosul Line. Disponível em: <www.mercosul-line.com.br>. Acesso em: 10 fev. 2014.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA E INFORMAÇÃO (MCTI). **Segunda Comunicação Nacional**. Disponível em: <www.mct.gov.br>. Acesso em: 17 set. 2015.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA (MME). Balanço Energético

Nacional. **ben.epe.gov.br**, 2013.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Política Nacional sobre Mudança do Clima**. Disponível em: <www.mma.gov.br>. Acesso em: 17 fev. 2015.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **1º Inventário Nacional de Emissões por Veículos Automotores Rodoviários - Ano-Base 2009**. Disponível em:

<http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_arquivos/inventario_veicular2010_163.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2014.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013 Ano-Base 2012**. Disponível em:

<http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Inventario_de_Emissoes_por_Veiculos_Rodoviaros_2013.pdf>. Acesso em: 15 set. 2015.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Disponível em: <www.mma.gov.br>. Acesso em: 16 set. 2014.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES (MT). **Diretrizes da política nacional de transporte hidroviário**. Disponível em: <www.transportes.gov.br>. Acesso em: 18 set. 2015.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES (MT). **Projeto de Reavaliação de Estimativas e Metas do PNLT Relatório Final**. Disponível em: <www.transportes.gov.br/images/2014/11/PNLT/2011.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2016.

MIOLA, A.; MARRA, M.; CIUFFO, B. Designing a climate change policy for the international maritime transport sector: Market-based measures and technological options for global and regional policy actions. **Energy Policy**, v. 39, n. 9, p. 5490–5498, set. 2011.

MIOLA, A. et al. **Regulating Air Emissions from Ships The State of the Art on Methodologies , Technologies and Policy Options**. Disponível em: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC60732/jrcrrshipspubs_ynov29_red.pdf>. Acesso em: 14 maio. 2014.

MIOLA, A.; CIUFFO, B. Estimating air emissions from ships: Meta-analysis of modelling approaches and available data sources. **Atmospheric Environment**, v. 45, n. 13, p. 2242–2251, abr. 2011.

PAXIAN, A. et al. Present-Day and Future Global Inventories Including Polar Routes. v. 44, n. 4, p. 1333–1339, 2010.

PLAMBECK, E. Reducing greenhouse gas emissions through operations and supply chain management. **Energy Economics**, v. 34, p. S64–S74, 2012.

POOLE, A. D.; HOLLANDA, J. B. DE; TOLMASQUIM, M. T. **Conservação de Energia e Emissões de Gases do Efeito Estufa no Brasil**. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/proclima/1998/11/14/conservacao-de-energia-e-emissoes-de-gases-do-efeito-estufa-no-brasil/>>. Acesso em: 17 abr. 2015.

PSARAFTIS, H.; KONTOVAS, C. Ship emissions study. **Laboratory for Maritime Transport, National Technical ...**, 2008.

ROHÁCS, J.; SIMONGÁTI, G. The role of inland waterway navigation in a sustainable transport system. **Transport**, v. XXII, n. 3, p. 148–153, 2007.

SANTOS BRASIL. **Relatório Anual De Sustentabilidade 2013**. Disponível em: <http://www.mrn.com.br/MateriaisParaDownload/RELATORIO_GRI_2012_MRN_final.pdf>. Acesso em: 16 set. 2016.

SANTOS, M. H. B. **Cabotagem, uma Alternativa Sustentável para a Região Amazônica**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

SCHROOTEN, L. et al. Emissions of maritime transport: a European reference system. **The Science of the total environment**, v. 408, n. 2, p. 318–23, 20 dez. 2009.

SONG, D.-P.; XU, J. An operational activity-based method to estimate CO2 emissions from container shipping considering empty container repositioning. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 17, n. 1, p. 91–96, jan. 2012.

SONG, D. D.-P. Co 2 Emission Analysis for Containerships Based on Service Activities. p. 1–17, 2010.

SUFRAMA. **Indicadores de Desempenho do Polo Industrial de Manaus**. Disponível em: <www.suframa.gov.br>. Acesso em: 13 maio. 2018.

SUPERINTENDÊNCIA DA ZONA FRANCA DE MANAUS (SUFRAMA). Disponível em: <www.suframa.gov.br>. Acesso em: 16 mar. 2014.

TEIXEIRA, K. M. **Investigação de opções de transporte de carga geral em contêineres nas conexões com a região amazônica**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2007.

THAYRINE ANDRESSA PEREIRA LEITE. Diagnóstico Energético de um Terminal Portuário localizado em Itajaí-SC com base na NBR ISO 50001 : 2011. 2014.

Transportadora Bertolini. Disponível em: <www.tbl.com.br>. Acesso em: 13 abr. 2017a.

Transportadora Bertolini.

TZANNATOS, E. Ship emissions and their externalities for the port of Piraeus – Greece. **Atmospheric Environment**, v. 44, n. 3, p. 400–407, jan. 2010.

UNITED NATIONS FOR DEVELOPMENT PROGRAM (UNDP). **Relatório do Desenvolvimento Humano de 2011 Sustentabilidade e Equidade**: Disponível em: <http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr_2011_pt_complete.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2014.

WANG, C.; CORBETT, J. Geographical Characterization of Ship Traffic and Emissions. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1909, n. 1, p. 90–99, 1 jan. 2005.

WANG, C.; CORBETT, J. J.; FIRESTONE, J. Modeling energy use and emissions from North American shipping: application of the ship traffic, energy, and environment model. **Environmental science & technology**, v. 41, n. 9, p. 3226–32, 1 maio 2007.

WBCSD; WRI. **GHG Protocol**. Disponível em: <<https://ghgprotocol.org/corporate-standard>>. Acesso em: 11 abr. 2014.