

ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS PROSPECTIVOS PARA O USO DE
ENERGIA E PARA EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DO
SETOR DE TRANSPORTES BRASILEIRO - UMA ABORDAGEM
MULTINÍVEL

Daniel Neves Schmitz Gonçalves

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes.

Orientador: Márcio de Almeida D'Agosto

Rio de Janeiro

Julho de 2022

ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS PROSPECTIVOS PARA O USO DE ENERGIA E
PARA EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DO SETOR DE
TRANSPORTES BRASILEIRO - UMA ABORDAGEM MULTINÍVEL

Daniel Neves Schmitz Gonçalves

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

Orientador: Prof. Márcio de Almeida D'Agosto, D.Sc.

Aprovada por: Profa. Andrea Souza Santos, D.Sc.

Prof. Amaro Olímpio Pereira Junior, D.Sc.

Prof. Bruno Vieira Bertoncini, D.Sc.

Dra. Luciana Maria Baptista Ventura, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2022

Gonçalves, Daniel Neves Schmitz

Elaboração de Cenários Prospectivos para o Uso de Energia e para Emissões de Gases de Efeito Estufa do Setor de Transportes Brasileiro - Uma Abordagem Multinível/ Daniel Neves Schmitz Gonçalves – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2022.

XIV, 183 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Márcio de Almeida D'Agosto

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2022.

Referências Bibliográficas: p. 157-167.

1. Introdução. 2. Método de Pesquisa. 3. Modelagem de Cenários de Energia e Emissões Atmosféricas. 4. Base de Métodos e Ferramentas de Energia e Emissões Atmosféricas. 5. Método Proposto. 6. Cenários Prospectivos do Setor de Transportes Brasileiro. 7. Conclusões, Limitações e Sugestões para Trabalhos Futuros. I. D'Agosto, Márcio de Almeida, II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

AGRADECIMENTOS

À Deus.

À minha família, por todo apoio, confiança, sobretudo ao respeitar minhas decisões, demonstrando preocupação com meu bem-estar e me impulsionando para a concretização dos meus sonhos, em especial aos meus pais, Márcia Valéria e Herbert, e meu irmão, Breno. Aos meus avós, Sebastião, Nelio, Herta e Laudette, *in memoriam*. À minha esposa, Mariane Gonzalez, grande incentivadora e apoiadora do meu trabalho, me ajudando, entendendo e dando forças durante o final dessa jornada. Agradeço, em especial, ao meu filho Eduardo e minha enteada Joana, que me dão a motivação, alegria e força necessária para buscar alcançar os meus objetivos.

Aos meus grandes amigos George e Pedro, pela parceria, apoio e palavras de força e motivação. Às amigas do doutorado, Tássia e Renata, verdadeiras companheiras, por toda a parceria durante esse processo de aprendizagem. Agradeço também a Lisia Carla, que me acolheu como se fosse da família, se preocupou, me incentivou e apoiou nessa jornada. Ao meu orientador, professor Márcio D'Agosto, por confiar, auxiliar e apoiar o meu trabalho, dando oportunidade de demonstrar que sou capaz de desenvolver e contribuir com assuntos relevantes para a área de Engenharia de Transportes, sendo mais que um orientador, um grande amigo. Aos membros e ex-membros do Laboratório de Transporte de Carga, pela amizade, horas de convívio, suporte e que sempre demonstraram interesse sobre andamento deste trabalho.

Aos professores da COPPE/UFRJ, o meu agradecimento por terem contribuído para minha formação profissional, por meio dos ensinamentos e experiências transmitidos, não só em sala de aula, mas em atuação em conjunto em projetos de pesquisa. Em especial, agradeço ao professor Emílio La Rovere, do PPE/COPPE/UFRJ, que confiou no meu trabalho e me deu a oportunidade de atuar em sua equipe em diversos projetos, e à equipe do Centro Clima, Carolina Dubeux, Carolina Grottera e William.

A todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho, sobretudo àqueles que participaram dos *workshops* e, por se tratar de uma grande quantidade de pessoas, não seria possível nomear a todos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

E, por fim, mas não menos importante, aos membros da banca pela gentileza em aceitar o convite para avaliar este trabalho e pelas críticas e sugestões construtivas que serviram para seu aperfeiçoamento.

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

ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS PROSPECTIVOS PARA O USO DE ENERGIA E
PARA EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DO SETOR DE
TRANSPORTES BRASILEIRO - UMA ABORDAGEM MULTINÍVEL

Daniel Neves Schmitz Gonçalves

Julho/2022

Orientador: Márcio de Almeida D'Agosto

Programa: Engenharia de Transportes

Para atingir as metas discutidas no Acordo de Paris, os países devem desenvolver estudos que projetem a demanda energética e as emissões de gases de efeito estufa (GEE) considerando diferentes níveis de ambição. Nos países emergentes, sobretudo, as transformações necessárias para um cenário de baixo carbono, terão que acompanhar o desenvolvimento socioeconômico e o acesso à mobilidade, considerando um espectro de opções de mitigação e o engajamento de *stakeholders*. Este estudo tem como objetivo estimar cenários prospectivos para uso de energia e para emissões do setor de transportes, por meio de uma abordagem metodológica multinível, contemplando a estruturação da série histórica e a calibração das estimativas futuras. Para isso, foram realizadas revisões da literatura que evidenciam lacunas no conhecimento quanto à modelagem do histórico de emissões e da demanda de energia, seleção de premissas, além da forma de calibração dos resultados e do nível de detalhamento das emissões. Assim, o método desenvolvido preenche essas lacunas, assegurando a consistência das estimativas. Como resultados, foi possível estabelecer dois cenários para o setor de transportes até 2050, que apontam que, em uma visão estratégica, a partir de 2021 as emissões de CO_{2e} poderiam ser reduzidas em 53% até 2050, em comparação com o cenário tendencial. Espera-se também uma redução da intensidade de carbono para 2050 de 71% para o transporte de passageiros e 61% para o transporte de carga. Como desdobramentos futuros, espera-se que a pesquisa subsidie decisões governamentais acerca de caminhos de descarbonização para o Brasil, considerando múltiplas perspectivas.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

DEVELOPMENT OF PROSPECTIVE SCENARIOS FOR ENERGY USE AND GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN THE BRAZILIAN TRANSPORT SECTOR - A MULTI-TIER APPROACH

Daniel Neves Schmitz Gonçalves

July/2022

Advisor: Márcio de Almeida D'Agosto

Department: Transportation Engineering

To achieve the commitments made under the Paris Agreement, countries must develop studies that project energy demand and greenhouse gas (GHG) emissions considering different levels of ambition. In emerging countries, the transformations required for a low carbon scenario will need to be linked to socioeconomic development and access to mobility, considering a spectrum of mitigation options and stakeholder engagement. This study aims to estimate prospective scenarios for energy use and emissions from the transport sector, using a multilevel methodological approach, covering the calculation of the historical series and the calibration of future estimates. The literature review carried out highlighted gaps in knowledge on the process of modeling historical emissions and energy use, in addition to the selection of assumptions, calibration protocol and level of detail of future estimates. The developed method then fills such gaps and ensures consistency of results. As a result, two scenarios for the transport sector up to 2050 were developed, pointing out that, in a strategic view, CO_{2e} emissions could be reduced by 53% by 2050, compared to the business-as-usual scenario. A reduction in carbon intensity is also expected, reaching 71% for passenger transport and 61% for freight transport. As future implications, the research can support government decisions about decarbonization paths for Brazil, considering multiple perspectives.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Problema e motivação.....	3
1.2	Premissas e hipóteses.....	7
1.3	Objetivos geral e específicos.....	8
1.4	Delimitação da pesquisa.....	9
1.5	Estrutura do trabalho.....	10
2	MÉTODO DE PESQUISA.....	12
2.1	Natureza das variáveis.....	13
2.1.1	Natureza qualitativa.....	13
2.1.2	Natureza quantitativa.....	14
2.2	Procedimentos.....	15
2.2.1	Pesquisa bibliográfica sistemática.....	15
2.2.2	Pesquisa bibliográfica narrativa.....	16
2.2.3	Pesquisa documental.....	17
2.3	Estudo de caso.....	18
2.4	Coleta de dados.....	19
2.5	Análise dos dados.....	19
2.6	Considerações finais do capítulo.....	21
3	MODELAGEM DE CENÁRIOS DE ENERGIA E EMISSÕES ATMOSFÉRICAS 23	
3.1	Conceitos.....	23
3.1.1	Capacidade.....	23
3.1.2	Cenários prospectivos.....	24
3.1.3	Forecasting e backcasting.....	24
3.1.4	Abordagens.....	25
3.1.5	Níveis (tier).....	26
3.1.6	Estimativa do CO ₂ e.....	27
3.2	Revisão Sistemática em cenários energéticos e emissões atmosféricas.....	27
3.2.1	Procedimento da revisão bibliográfica sistemática.....	27
3.2.2	Aplicação da revisão bibliográfica sistemática.....	30
3.3	Considerações finais do capítulo.....	39
4	BASE DE MÉTODOS E FERRAMENTAS DE ENERGIA E EMISSÕES ATMOSFÉRICAS EM TRANSPORTES.....	41
4.1	Pesquisa documental: fonte de dados.....	41
4.2	Discussão.....	44
4.3	Considerações finais do capítulo.....	52
5	MÉTODO PROPOSTO.....	54
5.1	Fase 1: Estruturação do histórico do setor.....	56
5.2	Fase 2: Planejamento do(s) cenário(s).....	73
5.3	Fase 3: Elaboração dos cenários.....	76
5.4	Considerações finais do capítulo.....	79
6	CENÁRIOS PROSPECTIVOS DO SETOR DE TRANSPORTES BRASILEIRO 81	
6.1	Estruturação do histórico do setor.....	82
6.2	Planejamento dos cenários.....	112
6.2.1	Diagnóstico do setor.....	112
6.2.2	Narrativa dos cenários.....	124
6.2.3	Síntese das premissas e tecnologias consideradas.....	135
6.3	RESULTADOS DOS CENÁRIOS ESTIMADOS.....	140

7	Conclusões, limitações e sugestões para trabalhos futuros	151
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	156
	APÊNDICE I – ORGANIZAÇÃO DE EVENTOS RELACIONADOS AO TEMA DE PESQUISA	167
	APÊNDICE II – EVOLUÇÃO DA FROTA CIRCULANTE POR TIPO DE VEÍCULO E TECNOLOGIA – Cenário tendencial	173
	APÊNDICE III – EVOLUÇÃO DA FROTA CIRCULANTE POR TIPO DE VEÍCULO E TECNOLOGIA – Cenário de desenvolvimento sustentável	176
	ANEXO A – PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS RELACIONADOS AO TEMA DE PESQUISA	180
	ANEXO B – ELABORAÇÃO DE RELATÓRIOS TÉCNICOS RELACIONADOS AO TEMA DE PESQUISA	181

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Abrangência geográfica dos 19 artigos inclusos.....	30
Figura 3.2: Distribuição dos trabalhos por periódico.	31
Figura 3.3: Abrangência temporal dos artigos inclusos na revisão.	31
Figura 3.4: Ano final dos cenários.....	32
Figura 4.1: Evolução do número de métodos e ferramentas de cenários e emissão de GEE.	42
Figura 5.1: TEMA.	55
Figura 5.2: Abordagem ASIF.....	61
Figura 5.3: Abordagem <i>Bottom-up</i>	65
Figura 5.4: Abordagem <i>Bottom-up</i> alternativa para os modos aéreo, aquático, dutoviário e ferroviário.	66
Figura 5.5: Abordagem ASIF para estimativas futuras.	78
Figura 6.1: Evolução da atividade de passageiros (a) e carga (b) por modo de transporte	88
Figura 6.2: Variação anual – (a) pass-km x PIB <i>per capita</i> e (b) t-km x PIB.....	89
Figura 6.3. Estimativa da evolução da frota Circulante por tipo de veículo.....	94
Figura 6.4 – Estimativa da evolução da frota Circulante de automóveis por tipo de tecnologia.....	94
Figura 6.5 – Estimativa da evolução da frota Circulante de veículos comerciais leves por tecnologia.....	95
Figura 6.6 - Estimativa da evolução da frota Circulante de motocicletas por tecnologia	95
Figura 6.7 – Estimativa da evolução da frota Circulante de ônibus.....	96
Figura 6.8 - Estimativa da evolução da frota circulante de comerciais leves e caminhões ciclo Diesel.	96
Figura 6.9: Demanda energética estimada para o transporte rodoviário (milhões de tep)	98
Figura 6.10: Participação relativa de fontes energéticas do transporte de passageiros (a) e carga (b) - 2019.....	98
Figura 6.11: Evolução da atividade de transporte do modo aéreo para (a) passageiros e (b) carga.....	101
Figura 6.12: Consumo energético por tipo de combustível do transporte aéreo.....	103
Figura 6.13: Evolução da atividade de transporte do modo ferroviário para (a) passageiros e (b) carga.....	105
Figura 6.14: Consumo energético por tipo de energia do transporte ferroviário.....	107
Figura 6.15: Evolução da atividade de transporte do modo aquático.....	108
Figura 6.16: Consumo energético estimado do transporte aquático.....	110
Figura 6.17: Evolução da atividade de transporte do modo dutoviário.....	111
Figura 6.18: Divisão modal de (a) passageiros e (b) carga em 2019.....	112
Figura 6.19: Consumo de energia do setor de transporte brasileiro.	113
Figura 6.20: Evolução do consumo de energético diesel e biodiesel no Brasil.....	115
Figura 6.21: Evolução das emissões do setor de transportes.....	116
Figura 6.22: Comparação dos resultados com estudos de referência.	118
Figura 6.23: Síntese dos principais marcos históricos que impactaram o setor de transportes.....	120
Figura 6.24: Síntese de marcos históricos que impactaram o setor de transportes.....	121

Figura 6.25: Evolução da atividade de passageiros por modo de transporte para o cenário BAU (a) e CDS (b)	141
Figura 6.26: Evolução da atividade de carga por modo de transporte para o cenário BAU (a) e CDS (b)	142
Figura 6.27: Divisão modal do transporte de passageiros do cenário BAU (a) e CDS (b) - 2050	143
Figura 6.28: Divisão modal do transporte de carga do cenário BAU (a) e CDS (b) - 2050	145
Figura 6.29: Evolução da demanda energética por tipo de energia - BAU (a) e CDS (b)	147
Figura 6.30: Evolução das emissões de CO _{2e} em ambos os cenários.....	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Principais elementos e opções de pesquisa.....	12
Tabela 2.2: Procedimento de pesquisa bibliográfica sistemática.	15
Tabela 3.1: Procedimento de pesquisa bibliográfica sistemática adotado no estudo	28
Tabela 3.2: Síntese dos artigos inclusos na revisão.....	33
Tabela 4.1: Categorias e parâmetros a serem identificados.....	44
Tabela 4.2: Ferramentas selecionadas	46
Tabela 4.3: Tipo de avaliação contemplados nas ferramentas analisadas.	51
Tabela 5.1: Dados anuais necessários para aplicação do método proposto.....	57
Tabela 5.2: Proposta de indicadores	74
Tabela 6.1: Dados necessários para aplicação do método proposto.....	83
Tabela 6.2: Intervalos de intensidade energética por modo e atividade de transporte	88
Tabela 6.3: Abordagens utilizadas por atividade e modo de transporte.....	91
Tabela 6.4: Intervalos de intensidade energética por modo e atividade de transporte	93
Tabela 6.5: Síntese das premissas e estratégias após validação do <i>stakeholders</i>	138
Tabela 6.6: Síntese das medidas de mitigação, barreiras e instrumentos	139

LISTA DE SIGLAS

ABRACICLO - Associação Brasileira dos fabricantes de motocicletas, ciclomotores, motonetas, bicicletas e similares
ACV - Análise de Ciclo de Vida
AFOLU - Agricultura, Floresta e Outros Usos da Terra
ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil
ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores.
ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes
ANTAQ - Agência Nacional de Transportes Aquaviários
ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres
AR – *Assessment Report*
ASIF - *Activity, Structure, Intensity and Fuel* (Atividade, infraestrutura, Intensidade e combustível)
ATSAP - *Air Traffic Safety Action Program*
BAU - *Business as Usual*.
BEN - Balanço Energético Nacional
BEV - Battery Electric Vehicle
B_x - Percentual de biodiesel adicionado ao diesel de petróleo
CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CENPES - Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello
CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CNT- Confederação Nacional dos Transportes
CO - Monóxido de carbono
CO₂ - Dióxido de Carbono
CO₂e - Dióxido de Carbono Equivalente
COP - Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
COPPE - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
EUA- Estados Unidos da América
FBMC - Fórum Brasileiro de Mudança do Clima
FE – Fator de Emissão
FINEP- Financiadora de Estudos e Projetos
GEE - Gases de Efeito Estufa
GIZ - *Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*
GNV- Gás Natural Veicular
GTP - *Global Temperature Potential* (Potencial de temperatura global)
GWP - *Global Warming Potential* (Potencial de Aquecimento Global)
HC - Hidrocarboneto
IATA - *International Air Transport Association*
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICAO - *International Civil Aviation Organization*
ICCT - *International Council on Clean Transportation*
ICS - Instituto Clima e Sociedade
IEA- *International Energy Agency* (Agência internacional de energia)
iNDCs: Contribuições Nacionalmente Determinadas Pretendidas.
IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental para a Mudança de Clima)

ITDP - *Institute for Transportation and Development Policy*
ITF - *International Transport Forum*
LTC - Laboratório de Transportes de Carga
MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Informação
MESSAGE - *Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact*
MMA – Ministério do Meio Ambiente
MP – Material Particulado
NAMA - *Nationally Appropriate Mitigation Actions* (Ações de Mitigação Nacionalmente Apropriadas)
NDC - *Nationally Determined Contribution* (Contribuições Nacionalmente Determinadas)
NMVOC - Compostos orgânicos não voláteis
NO_x - Óxidos de Nitrogênio
NTC - Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística
ONGs - Organizações Não Governamentais
ONU - Organização das Nações Unidas.
PA - Poluentes atmosféricos
PET- Programa de Engenharia de Transporte
PIB - Produto Interno Bruto
PLVB – Programa de Logística Verde Brasil
PNE - Plano Nacional de Energia.
SAR – *Second Assessment Report*
SIG - Sistemas de Informações Geográficas
SLoCAT - *Partnership on Sustainable, Low Carbon Transport*
TAR – *Third Assessment Report*
TEMA - *Transportation energy-emissions multi-tier analysis modeling*
TUC- Transporte Urbano de Carga
UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro
WHO – World Health Organization

LISTA DE UNIDADES

t – Tonelada
km – Quilometro
kg – Quilograma
m³ – Metro cúbico
\$ – Cifrão
% – Porcentagem
g – Grama
kW – Quilowatt
kJ – Quilojoule
und – Unidade
h – Hora
l – Litro
tep – Tonelada equivalente de petróleo

1. INTRODUÇÃO

Desde 1970, as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) relacionadas ao setor de transportes cresceram em um ritmo mais intenso do que em outros subsetores de energia (SIMS *et al.*, 2014). O setor apresentou crescimento médio de 2,5% a.a. no mundo entre 2010 e 2015 (IEA, 2017a), atingindo 18% de participação no consumo energético global (EIA, 2021). Nessa linha, as Ações de Mitigação Nacionalmente Apropriadas (NAMAs) e as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC), alinhadas com os objetivos do Acordo de Paris, são medidas que têm sido adotadas por países como meio de promover a mitigação da emissão de GEE, atenuando os efeitos da mudança do clima.

Assim, a tendência do aquecimento global tem se intensificado nas últimas décadas, dada relação entre as emissões de GEE pelas atividades humanas e o aumento da temperatura média do planeta (IPCC, 2021). Dessa forma, o desenvolvimento de modelos a partir de cenários de descarbonização é relevante para a revisão das estratégias e níveis de ambição estabelecidos nos países como forma de manter o aquecimento global abaixo dos 2°C, idealmente abaixo de 1,5°C.

Nesse contexto, a descarbonização do setor de transportes é fundamental para o alcance desses níveis, pois é um dos setores que mais contribui para a emissão de GEE, com cerca de 7,8 Gt CO_{2e} emitidos em 2015, com aumento de 68% em relação ao ano de 1990 (IEA, 2017b), e 8,3 Gt CO_{2e}, em 2018, que representa aproximadamente 17% das emissões antrópicas globais (CLIMATE WATCH, 2021).

Assim, a descarbonização do setor de transportes é um desafio a ser enfrentado para limitar as mudanças do clima. Ainda, a comunidade científica tem postulado consistentemente a hipótese de que o setor de transporte tende a reagir tardiamente às políticas de mitigação do que outros setores, além de apresentar uma dependência histórica

dos combustíveis fósseis, sendo apontado como um dos setores mais complexos para se descarbonizar (SCHÄFER e JACOBY, 2006; PIETZCKER *et al.*, 2014).

Logo, esse desafio se reflete nos compromissos internacionais, sendo considerado em 77% das iNDCs (intensões) submetidas ao final de 2015 (GOTA *et al.*, 2015). No entanto, as avaliações da mitigação das emissões de GEE no transporte, o potencial global de mitigação e os custos envolvidos são ainda inconsistentes (SIMS *et al.*, 2014) e os atuais compromissos firmados e políticas dos países por meio de suas NDCs são insuficientes para modificar a tendência de crescimento das emissões do setor (ITF, 2021)

Nessa linha, por meio da análise do cenário em que apenas as políticas declaradas são consideradas, estima-se que as emissões do setor de transportes continuarão aumentando em 8% até 2030 e 11% até 2050, em relação ao ano base de 2019 (IEA, 2021). Dessa forma, é necessário o aumento contínuo das ambições nas futuras NDCs, e especificamente para o setor de transportes, pois de acordo com o ITF (2021), apenas 16% das NDCs apresentadas até outubro de 2021 incluíam metas de redução de emissões de transporte, com a grande maioria das medidas apresentadas focando na redução do consumo de combustível, no desenvolvimento de biocombustíveis e uso de veículos elétricos.

Nos países emergentes, como o Brasil, as transformações necessárias para um cenário de baixo carbono, mais do que no resto do mundo, terão de acompanhar o desenvolvimento socioeconômico e o acesso à mobilidade. No entanto, ao explorar esses cenários, estudos recentes sugerem como pontos chave para elaboração de cenários prospectivos uma abordagem de amplo espectro de opções de mitigação e que sejam acessíveis à comunidade responsável pela tomada de decisão, por meio do diálogo e engajamento com *stakeholders*. Para tal, a adoção de uma abordagem qualitativa-quantitativa, que explicita

muitos dos pressupostos incorporados nas narrativas, permite uma melhor compreensão dos cenários e representação do modelo (IPCC, 2018; LEFEVRE *et al.* 2020).

Buscando uma contribuição nesta área do conhecimento, esta tese propõe a estimativa e análise de cenários de uso de energia e suas conseqüentes emissões de GEE no Brasil, por meio de uma abordagem multinível, apresentando um procedimento detalhado que considera: (i) o levantamento e consolidação do histórico de dados referentes a atividade de transporte; (ii) sua respectiva demanda de energia e conseqüente emissão de GEE; (iii) o levantamento de premissas e hipóteses a serem considerados nas estimativas; (iv) a seleção de *stakeholders*; (v) o método de seleção das premissas e hipóteses; (vi) a estimativa da demanda de energia e a conseqüente emissão de GEE; e (vii) indicadores de monitoramento.

1.1 Problema e motivação

Os transportes são os maiores consumidores de combustíveis derivados de petróleo, uma fonte de energia não renovável. Cerca de 95% do consumo mundial de energia no setor de transporte é verificado na forma de derivados de petróleo (IEA, 2021).

No Brasil, a demanda energética do subsetor de transportes (Setor de energia) cresceu cerca de 61% no período de 2005 a 2019, aumentando sua participação para 35% do consumo final de energia (EPE, 2020). Isso corresponde a 68% do consumo de combustíveis fósseis, e 14,1% das emissões GEE, emissões menores apenas do que os setores do Campo e pastagem, Uso da Terra, Mudança do uso da Terra e Florestas (LULUCF, no acrônimo em inglês) e fermentação entérica (Agropecuária), que correspondem a cerca de 43,6% e 19,3% das emissões de GEE, respectivamente (MCTI, 2020).

Outra análise que reforça o papel estratégico do setor de transportes é do momento de transporte, por meio da alta correlação existente entre a movimentação de pessoas e cargas e o produto interno bruto (PIB) no mundo (TOB-OGU *et al.*, 2018) em sua forma agregada ou *per capita*. No Brasil, entre o período de 2005 e 2015, os momentos de transporte de passageiros e de carga cresceram 73% e 47%, respectivamente, enquanto o PIB cresceu aproximadamente 32%, a população 10% e o PIB *per capita* 20% (GONÇALVES *et al.*, 2017). A tendência é que o Brasil e os demais países cresçam demograficamente e economicamente, aumentando então a atividade de transportes que, por sua vez, em se mantendo o comportamento atual, tende a aumentar a demanda energia e conseqüentemente as emissões de GEE e poluentes atmosféricos (PA).

Além disso, cerca de 54% da população mundial vive em áreas urbanas e esta tendência é crescente no século XXI (UNITED NATIONS, 2014). Garantir a sustentabilidade para a mobilidade de pessoas e cargas nas cidades é outro desafio de igual envergadura para as próximas décadas. Segundo a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2018), os transportes são a maior fonte de PA nas cidades, responsáveis por prejuízos sociais significativos decorrentes de doenças respiratórias, cardiovasculares e neurológicas, estresse e mortes devido a acidentes.

A busca por cenários sustentáveis coloca os setores com maior representação nas emissões de GEE no país diante de novos desafios. Esses desafios devem ser reconhecidos e discutidos para o aprimoramento do planejamento setorial sob a ótica do poder público, da iniciativa privada e da sociedade civil organizada.

A elaboração de cenários prospectivos de uso de energia e emissões de GEE é uma ferramenta que possibilita a identificação e proposição de respostas quanto aos impactos econômicos, ambientais e sociais da aplicação de diferentes conjuntos de medidas de

mitigação de emissões de GEE. Ainda, os cenários envolvem o entendimento da natureza de milhões de fontes móveis e como elas são afetadas por várias questões relacionadas ao transporte, tais como políticas, investimentos em infraestrutura e penetração de novas tecnologias no mercado (Gonçalves *et al.*, 2020).

Porém, de acordo com a DHL (2012), que é importante ressaltar que nenhum dos cenários reflete uma visão definida de como o futuro de fato se desenvolverá, mas aponta para as melhores decisões a serem adotadas hoje para alcançar metas futuras, pois os cenários são histórias baseadas em dados sobre o amanhã que abordam escolhas importantes que devem ser tomadas agora.

Desta forma, cenários não são previsões, são hipóteses que descrevem possibilidades muito diferentes para o futuro. Bons cenários ampliam o pensamento crítico e fornecem uma estrutura coerente que permite compreender a complexidade de um caso e suas variáveis de influência, explorar possibilidades de maneira sistemática e ampliar os limites da plausibilidade (DHL, 2012).

No entanto, garantir a qualidade e confiabilidade das estimativas das emissões dos cenários envolve o uso de modelos robustos de medição e projeção, especialmente ao avaliar os compromissos nacionais de mitigação (GONÇALVES *et al.* 2019a). Embora a abordagem *top-down* seja conveniente para detectar o sucesso ou o fracasso dos países em reduzir as emissões de GEE, essa abordagem é incapaz de indicar onde as políticas de mitigação prospectivas serão mais eficazes (LEIP *et al.*, 2018).

Em contraste com o foco cada vez maior nos inventários nacionais de GEE (SAIKAWA *et al.*, 2017; EEA, 2018; EPA, 2018), há uma falta de estudos transparentes que construam uma linha de base de forma consistente e projetem os resultados de acordo com opções de mitigação e tendências econômicas realistas. Essa falta de transparência torna de difícil

compreensão o comportamento das emissões e ações definidas no cenário tendencial, dificultando a comparação de cenários de emissões entre países (CLAPP e PRAG, 2012).

Nessa linha, estudos nessa área do conhecimento têm se concentrado principalmente na previsão da demanda de energia no uso final (HOOPER *et al.*, 2018), sendo apenas algumas delas relacionadas as abordagens detalhadas de emissão e políticas governamentais (GONÇALVES, *et al.* 2019). Ademais, poucas estratégias foram estabelecidas de modo a associar esses resultados às metas de mitigação e projetá-los ao longo do horizonte dos compromissos internacionais (por exemplo, NDC), considerando diferentes níveis de ambição e compromisso político (HOOPER *et al.*, 2018). Além disso, não incluem um processo de monitoramento do cumprimento das metas de redução de emissões de GEE (VIEWEG, 2017).

Portanto, a estimativa do histórico (atividade, energia e emissões), o levantamento e a seleção de medidas de mitigação para o setor e análise dos resultados a longo prazo, permite identificar políticas de mitigação que revelem melhores respostas quanto aos impactos econômicos e sociais, analisando as implicações da adoção de diferentes conjuntos de medidas de mitigação de emissões de GEE. O aspecto da originalidade reside no fato de que uma estratégia semelhante à proposta nesta tese, abrange quanto ao conjunto de contribuições ao processo de previsão acima descrito, não foi identificada em nenhum dos estudos preliminares analisados.

Busca-se, com este estudo, oferecer aos tomadores de decisão, do poder público e da iniciativa privada, com base na aplicação do método desenvolvido. Dessa forma, verifica-se o potencial dos cenários prospectivos para uso de energia e emissões de GEE em transportes, tanto para o atendimento de compromissos internacionais (NAMA e NDC), quanto para de aprimoramento da gestão do sistema de transporte.

Diante do exposto, dado a identificação do problema, surge a questão central acerca do objeto de estudo: “Existe um método detalhado para estruturar a linha de base, identificar e selecionar medidas governamentais vigentes, tendências de mercado e ações de mitigação para modelar e monitorar cenários prospectivos?”. Adicionalmente, levanta-se as seguintes questões de pesquisa acerca do objeto de estudo, buscando explorar lacunas e/ou aprofundar métodos existentes que busquem responder à questão central, são elas:

- Como estruturar um histórico de atividade, energia e emissões, considerando todo o setor de transporte (passageiros e carga)?
- Como verificar a aderência dos dados de emissões de um país considerando o nível metodológico (abordagem e *tier*), bem como qual a comunicação de potencial de aquecimento global (GWP) se deve considerar para a estimativa do CO₂e?
- Como levantar premissas e hipóteses relacionadas as medidas de mitigação a serem consideradas nos cenários prospectivos?
- Como analisar a consistência dos dados e validar os resultados dos cenários modelados?

1.2 Premissas e hipóteses

Para realização desta tese, adotou-se como premissas:

- Necessidade de um procedimento/método detalhado que contemple desde a estruturação do histórico até as estimativas futuras, passando pelas etapas de consulta e treinamento a *stakeholders* seleção e/ou validação de medidas de mitigação;
- Convencionalmente é considerado apenas o transporte realizado dentro das fronteiras nacionais (transporte doméstico) para os cenários prospectivos de uso de energia e suas consequentes emissões de GEE;

- Existe uma forte correlação entre a movimentação de pessoas e cargas e o PIB no mundo, em sua forma agregada ou *per capita*;
- Convencionalmente são considerados nos modelos de emissão de GEE, com enfoque no uso final, do setor de transportes, os gases: CH₄, N₂O e CO₂.

Para realização desta tese, adotou-se como hipóteses:

- É possível estabelecer um método detalhado, que possa ser adotado em qualquer país, e que considere o levantamento e consolidação do histórico de dados referentes a atividade de transporte, sua respectiva demanda de energia e consequente emissão de GEE, bem como indicadores de monitoramento.
- É possível aplicar o método por meio de técnicas científicas, de forma a torná-lo válido cientificamente.
- É possível que os cenários criados sejam capazes de apoiar a tomada de decisão por parte do poder público, da iniciativa privada e a sociedade, de uma forma geral, mostrando caminhos sustentáveis para o setor de transportes.

1.3 Objetivos geral e específicos

Esta tese tem como objetivo geral construir cenários prospectivos para o uso de energia e para emissões de gases de efeito estufa do setor de transportes brasileiro, por meio do desenvolvimento de um método detalhado que contemple desde a consolidação da série histórica, levantamento e seleção de premissas e hipóteses, definição de indicadores e calibração das estimativas.

Como objetivos específicos desta tese têm-se:

- Avaliar e selecionar dados de atividade de transporte de diferentes estudos e instituições;

- Verificar a aderência dos dados de emissões de um país com o nível metodológico (*tier*), bem como qual a comunicação de GWP se deve considerar para a estimativa do CO_{2e};
- Desenvolver ou aperfeiçoar a função de sucateamento para estimativa da frota circulante por tipo de veículo e tecnologia;
- Aperfeiçoar ou atualizar variáveis-chave como intensidade de uso e rendimento energético dos veículos rodoviários;
- Criar protocolo para o levantamento de premissas e hipóteses a serem consideradas nos cenários;
- Elaborar critério para identificação e seleção de especialistas, bem como a forma de conduzir um debate, com o objetivo de selecionar as medidas de mitigação levantadas;
- Elaborar um método de calibração dos resultados de atividade, energia e emissões.

1.4 Delimitação da pesquisa

O estudo propõe um método para elaboração de cenários prospectivos para o uso de energia e emissões de GEE em transportes. Considerou-se apenas o transporte doméstico, seguindo o padrão dos inventários e estimativas nacionais (MMA, 2013; MCTI, 2016; GONÇALVES e D'AGOSTO, 2017; ROVERE *et al.*, 2018; MCTI, 2020; PRATES *et al.*, 2021). O método contempla exclusivamente análise em nível nacional, uma vez que as variáveis de entrada e as formas de calibração dos resultados diferem das análises no nível estadual e municipal.

Limita-se as emissões de uso final (tanque à roda), em linha com o inventário nacional (MCTI, 2020), de modo a evitar a sobreposição com os resultados dos demais setores econômicos.

Além disso, considera todos os modos de transporte para cada atividade (passageiro e carga), inclusive o modo dutoviário e o transporte ativo, que não são observados na maior parte dos artigos, relatórios técnicos e ferramentas disponíveis na literatura.

O método desenvolvido se baseia em conceitos e aplicações já consagradas, entretanto, de forma estruturada e detalhada, sendo acrescentado o que se considera imprescindível para complementar a prática convencional e preencher a lacuna existente com base no conhecimento e experiências adquiridas pelo autor.

Os intervalos de observação (registros históricos) e projeção (cenários) seguem uma base anual, em concordância com os principais relatórios do setor de energia, bem como por recomendação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (SIMS *et al.*, 2014).

1.5 Estrutura do trabalho

Esta tese é dividida em 7 Capítulos, conforme se descreve a seguir:

- O Capítulo 1 apresenta a introdução, o problema e motivação para este estudo, as premissas e hipóteses, os objetivos, além da delimitação da pesquisa;
- O Capítulo 2 retrata o método de pesquisa utilizado para o desenvolvimento da tese;
- O Capítulo 3 apresenta uma pesquisa bibliográfica sistemática com o propósito de identificar como é abordada, na literatura existente, a modelagem de cenários prospectivos tanto em termos conceituais como metodológicos. Busca-se, portanto, confirmar na literatura a existência das lacunas no conhecimento que esta tese busca preencher ou identificar oportunidades de aprimoramento de métodos existentes;
- O Capítulo 4 exibe uma pesquisa documental para levantar os métodos/ferramentas disponíveis e utilizadas em relatórios internacionais de instituições selecionadas. O

objetivo principal deste capítulo é identificar a abrangência e limitações de cada método/ferramenta, de forma a identificar lacunas que se possa aperfeiçoar ou direcionar ao mais adequado;

- O Capítulo 5 descreve o método desenvolvido nesta tese, que consiste na elaboração de cenários prospectivos de uso de energia e emissões de GEE em transportes em nível nacional, que contempla desde a consolidação da série histórica, levantamento e seleção de premissas e hipóteses, definição de indicadores e calibração das estimativas;
- O Capítulo 6 apresenta a aplicação do método proposto na tese, bem como os resultados alcançados por meio da realização de uma aplicação no Brasil, considerando a composição e análise do histórico do setor; e
- Por fim, no Capítulo 7, são apresentadas as conclusões, limitações e sugestões para trabalhos futuros.

2 MÉTODO DE PESQUISA

Este Capítulo expõe os aspectos teórico-metodológicos considerados para a realização da pesquisa. Optou-se por sintetizar todos os procedimentos adotados na tese e nas revisões específicas em um capítulo, como forma de facilitar a compreensão do fenômeno e de como se pretende abordá-lo metodologicamente.

Preliminarmente, define-se os conceitos que servem de base para as formas de pesquisa que são adotadas ao longo do estudo, considerando, para isso, os trabalhos de Gil (2008) e Freitas e Jabbour (2011). Gil (2008) classifica uma pesquisa em três elementos principais: (1) Natureza das variáveis; (2) Objetivos; e (3) Procedimentos. Tais critérios são complementares e devem ser escolhidos conforme o fenômeno a ser estudado.

A Tabela 2.1 mostra as variantes dos três elementos adotados na metodologia de pesquisa desta tese, subsequentemente as opções utilizadas nesta tese são descritas em seções específicas.

Tabela 2.1: Principais elementos e opções de pesquisa.

Elemento	Opções	Descrição
Natureza das variáveis	Quantitativa	Busca-se definir de forma clara as hipóteses e as variáveis, sendo possível obter uma medição precisa do problema abordado.
	Qualitativa	Busca-se verificar o fenômeno por meio da observação e do estudo.
Objetivos	Exploratória	Busca-se proporcionar maior familiaridade com o problema abordado.
	Descritiva	Busca-se descrever as características de determinada população ou fenômeno.
	Explicativa	Busca-se identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência do fenômeno.
Procedimentos	Pesquisa bibliográfica	Constituída principalmente de livros e artigos científicos.
	Pesquisa documental	Constituída de documentos e arquivos particulares ou relatórios de instituições, pública ou privada.
	Pesquisa experimental	Constituída basicamente de testes ou experimentos, muitas vezes realizado em laboratório.
	Levantamento	Constituída de interrogação direta das pessoas, cujo comportamento se deseja conhecer.

Elemento	Opções	Descrição
	Estudo de campo	Constituída de um aprofundamento de uma realidade específica.
	Estudo de caso	Constituída de um estudo profundo de um, ou poucos objetos, de maneira que se permita seu amplo e detalhado conhecimento.
	Pesquisa-ação	Constituída de uma base empírica, onde o pesquisador está envolvido de modo cooperativo ou participativo com o problema.

Fonte: Elaboração própria com base em Oliveira (2016) e Gil (2008).

Para efeito desta tese, utiliza-se pesquisas de ambas as naturezas (quantitativa e qualitativa) e três objetivos (exploratória, descritiva e explicativa), dada a complexidade do estudo. No tocante aos procedimentos para a realização do estudo, adotam-se: (1) Pesquisa bibliográfica; (2) Pesquisa documental e (3) Estudo de caso.

As seções subsequentes do capítulo abordam as razões para a utilização de cada elemento de pesquisa e, além disso, descrevem os procedimentos utilizados.

2.1 Natureza das variáveis

Para elaboração dos capítulos foram adotadas pesquisas com naturezas qualitativa e quantitativa.

2.1.1 Natureza qualitativa

A pesquisa qualitativa centra-se nos aspectos de fenômenos que não podem ser quantificados, baseando-se na compreensão e explicação da dinâmica das relações sociais (GERHARDT, 2009). Por conseguinte, a adoção de uma pesquisa qualitativa é preponderante para as atividades como a definição e seleção de métodos e ferramentas, constituintes da pesquisa bibliográfica sistemática sobre modelagem de cenários de energia e GEE desenvolvida e apresentada no Capítulo 3. A estruturação da pesquisa

qualitativa é influenciada por pesquisas sistemáticas com propósitos semelhantes e baseia-se na experiência do autor com a temática. O mesmo ocorre no Capítulo 4, em que é levantado e apresentado os métodos/ferramentas disponíveis e utilizadas em relatórios internacionais de diversas instituições.

Do mesmo modo, lança-se mão da pesquisa qualitativa na atividade de aplicação do método proposto (Capítulo 6), especificamente para análise e seleção de premissas e hipóteses, além do plano de fundo que norteia a elaboração dos cenários prospectivos de energia e emissão de GEE. A partir disso, as premissas e hipóteses são discutidas com um grupo de especialistas, no intuito de identificar variantes que possam representar melhor o fenômeno ou convergir as premissas e hipóteses selecionadas em um consenso entre os especialistas. Portanto, em relação à análise de dados, o método de pesquisa qualitativa utilizado nos Capítulos 3, 4 e 6, são descritos também, e com maior profundidade, nas subseções 2.2.3 e 2.2.2, respectivamente.

2.1.2 Natureza quantitativa

Essencialmente, a análise dos dados nas pesquisas experimentais e nos levantamentos é quantitativa, no entanto, essa natureza é menos presente nas pesquisas definidas como estudos de campo, estudos de caso, pesquisa-ação ou pesquisa participante (GIL, 2008), visto que necessitam da participação ativa do pesquisador no objeto de estudo e da sua interpretação do problema.

A natureza quantitativa da pesquisa é observada no Capítulo 6, ao modelar matematicamente, com base nas premissas e hipóteses definidas qualitativamente, as variáveis identificadas na literatura para a linha de base e os cenários futuros de atividade de transporte, consumo energético e emissões de GEE.

Apesar da natureza qualitativa, a pesquisa bibliográfica sistemática utilizada no Capítulo 3 apresenta em parte uma natureza quantitativa ao estratificar os dados da pesquisa, por exemplo, com base na origem da pesquisa, autores, aplicação etc., para verificação de lacunas no conhecimento.

2.2 Procedimentos

A tese leva em consideração as pesquisas: bibliográfica (sistemática e narrativa), documental e estudo de caso.

2.2.1 Pesquisa bibliográfica sistemática

Uma pesquisa bibliográfica sistemática busca sintetizar e analisar o estado da arte de uma área do conhecimento (ROWLEY e SLACK, 2004), sendo um estudo secundário que busca reunir, sintetizar e integrar resultados primários (OLIVEIRA, 2016). Portanto, para esta tese, adotou-se uma pesquisa sistemática com o objetivo de identificar as etapas metodológicas de modelos de inventário de emissões de GEE, considerando cenários prospectivos. Concomitantemente, busca-se identificar lacunas que representem oportunidades de aperfeiçoamento metodológico. Optou-se pelo uso desse procedimento sistemático devido ao propósito de aumentar a consistência dos resultados e diminuir a possibilidade de erros (COOK *et al.*, 1997), especialmente em relação à existência de viés, erro sistemático ou tendencial.

Com base no estudo de Tranfield *et al.* (2003), a pesquisa bibliográfica sistemática é composta por três atividades: (1) Planejamento, (2) Realização; (3) Comunicação e divulgação. Nesse procedimento, cada atividade possui subetapas que são expostas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Procedimento de pesquisa bibliográfica sistemática.

Procedimento metodológico	Subetapas
1. Planejamento	1.1 Identificar a necessidade da pesquisa
	1.2 Elaborar a proposta da pesquisa
	1.3 Desenvolver o protocolo da pesquisa
2. Realização	1.1 Identificar e selecionar os trabalhos
	1.2 Avaliar os trabalhos selecionados
	1.3 Extrair dados e informações
	1.4 Sintetizar os dados
3. Divulgação	1.1 Elaborar os relatórios
	1.2 Apresentar os resultados

Fonte: Tranfield *et al.* (2003).

A partir dessas etapas metodológicas, Oliveira *et al.* (2017) adaptaram o procedimento de Transfiel *et al.* (2003), simplificando a atividade de realização da revisão por meio da unificação das etapas 1.2 e 1.3, além de analisar os resultados na etapa de Realização. Assim, este trabalho utiliza o procedimento de Oliveira *et al.* (2017), desenvolvendo a pesquisa com base com base nas três atividades principais:

1. A atividade de Planejamento abrange a identificação do problema de pesquisa, definição do objetivo da revisão sistemática e desenvolvimento do protocolo de pesquisa;
2. A atividade de Realização da revisão consiste na identificação, seleção, inclusão e análise dos trabalhos;
3. O procedimento para Comunicação e Divulgação da pesquisa bibliográfica sistemática consiste na elaboração de um relatório da revisão sistemática.

2.2.2 Pesquisa bibliográfica narrativa

As pesquisas narrativas geralmente são abrangentes e cobrem uma ampla gama de questões dentro de um determinado tópico, mas não necessariamente declaram ou seguem regras sobre a busca de evidências (COLLINS e FAUSER, 2005). Constituem, portanto,

de análise da literatura publicada em livros, periódicos, na interpretação e análise crítica pessoal do autor (CALIL SALLUM *et al.*, 2012).

A principal diferença entre a pesquisa bibliográfica narrativa e a sistemática é a estrutura da pesquisa, por exemplo, a narrativa não descreve necessariamente os critérios para escolha dos artigos e para a análise. No entanto, a pesquisa sistemática pode tender a perder o laço histórico do problema, uma vez que restrições excessivas nos critérios de busca podem desvirtuar o objetivo de discutir o problema desde a origem histórica até os efeitos no presente.

2.2.3 Pesquisa documental

Preliminarmente, é importante conceituar a pesquisa documental como forma de expor as razões para a sua adoção nesta pesquisa. Assim, Sá-Silva (2009) define uma pesquisa documental como um procedimento que se utiliza de métodos e técnicas para a apreensão, compreensão e análise de documentos dos mais variados tipos. Utiliza-se a pesquisa documental como forma de eliminar possíveis vieses do autor, uma vez que consiste em relatórios (documentos) oficiais de instituições públicas ou associações sem fins lucrativos cujo escopo está diretamente relacionado ao objeto de estudo.

Portanto, para elaboração dos Capítulos 4 e 6, optou-se por fazer uma pesquisa documental por meio de uma pesquisa bibliográfica narrativa. A diferença em relação à pesquisa sistemática do Capítulo 3 se baseia na inexistência de protocolo de pesquisa, bem como na natureza das fontes, ou seja, materiais que não receberam um tratamento analítico de terceiros, tais como relatórios técnicos, relatórios acadêmicos, guias de boas práticas etc., elaborados por instituições nacionais e internacionais.

2.3 Estudo de caso

O estudo de caso é uma estratégia de pesquisa que visa entender a dinâmica presente dentro de configurações únicas, combinando métodos de coleta de dados, como relatórios, entrevistas, questionários e observações (EISENHARDT, 1989). A evidência pode ser qualitativa, quantitativa ou ambas. Para Yin (2003), um estudo de caso deve ser utilizado se busca responder as questões de pesquisa de “como” e “por que” acerca de um determinado fenômeno que: (1) não há controle sobre eventos comportamentais; e (2) focaliza acontecimentos contemporâneos.

Yin (2011) defende que um estudo de caso é composto por três atividades: (1) definição do “Caso”; (2) coleta de dados; e (3) análise dos dados. A definição do caso pode ser compreendida como a descrição do problema a ser investigado e a caracterização do objeto a ser analisado, consistindo em levantar os aspectos geográficos, uso do solo, demografia, operação etc. A coleta de dados pode ser realizada por pesquisa bibliográfica, observação, entrevista com os atores etc. Por fim, a análise dos dados busca realizar o tratamento dos dados e diagnosticar o problema. Voss *et al.* (2002) afirmam que um estudo de caso contribui com uma compreensão da realidade contemporânea; possibilidade de testar uma teoria existente e possibilidade de desenvolver novas teorias.

Na literatura sobre modelagem de atividade, energia e emissões de GEE, diversos autores lançam mão de estudos de caso para explicar o comportamento das variáveis em um contexto específico a fim de justificar a relevância do estudo (JABER, 2012; WEN, 2014; TRAVESSET-BARO, 2016).

Neste estudo, também se utiliza de um estudo de caso para aferir a linha de base de atividade, energia e emissões de um determinado país e modelar as variáveis considerando cenários futuros de ambição. Apesar de generalista, o método é aplicado

em somente um país, devido ao uso excessivo de recursos na fase de modelagem. Adicionalmente, análise dos dados foi realizada com base no referencial teórico utilizado neste estudo e, posteriormente, um cruzamento entre os dados levantados e aqueles do referencial teórico identificado nas pesquisas bibliográficas sistemática, narrativa e documental.

2.4 Coleta de dados

Os protocolos para coleta de dados podem ser adotados com base em revisões de registros, artigos e relatórios ou por entrevistas com os atores envolvidos na problemática (PECORA, 2009). Assim, a coleta de dados pode ser de três tipos: (i) estruturada com um roteiro preestabelecido; (ii) estruturada com roteiro a partir de um formulário elaborado e respondido com antecedência; e (iii) não estruturada, quando não existe rigidez de roteiro (OLIVEIRA, 2016).

Nesta pesquisa, adota-se a coleta de dados estruturada conforme apresentado no Capítulo 3. Para tal, foram utilizados procedimentos sistemáticos na identificação de ferramentas de modelagem, bem como lacunas para aperfeiçoamento (Capítulos 3, 4 e 6) e realizada consultas com especialistas para aferir premissas e hipóteses consistentes com o fenômeno (cenários de emissões de GEE).

2.5 Análise dos dados

A análise de dados é um processo de inspeção, tratamento e modelagem de dados com o objetivo de identificar informações pertinentes e aferir conclusões para apoiar a tomada de decisões. A análise de dados tem múltiplas facetas e abordagens, englobando diversas técnicas em diferentes domínios de negócios e pesquisas científicas.

Apesar da natureza quantitativa desta pesquisa, a definição de premissas e hipóteses futuras para as emissões de GEE segue um protocolo qualitativo, por meio de consultas à especialistas individualmente e pela realização de *workshops* com grupos de atores-chave representativos da comunidade acadêmica, iniciativa privada, poder público e comunidade civil. O objetivo geral da realização de um *workshop* não é necessariamente chegar a um consenso, mas identificar lacunas no conhecimento, encontrar novas maneiras de abordar questões controversas e definir prioridades para pesquisas futuras (GIGERENZER, 2002).

Para a análise dos dados da modelagem, O'Neil e Schutt (2013) sugerem a adoção de diversos procedimentos distintos que, quando utilizados de forma sistemática, contribuem com a análise consistente dos dados. Isto posto, consideram-se as seguintes etapas:

- Requisitos de dados: variáveis específicas relativas à uma população (por exemplo, idade e renda) que possam ser especificadas e obtidas. Os dados podem ser numéricos ou categóricos;
- Coleta de dados: procedimentos para obtenção de dados de várias fontes como documentos e relatórios, sensores eletrônicos e entrevistas com especialistas;
- Processamento e verificação da consistência dos dados: trata-se da transformação de informação bruta em conhecimento específico. Depois de processados e organizados, os dados podem estar incompletos, conter duplicidade ou inconsistências;
- Análise de dados: existem uma variedade de técnicas referidas como análise exploratória de dados para compreender as informações armazenadas. Algoritmos podem ser aplicados aos dados para identificar relações entre as variáveis, como correlação ou causação. Ademais, um produto de dados é um aplicativo de computador que recebe entradas de dados e gera saídas, alimentando-as de volta ao

ambiente. Esta ferramenta pode ser utilizada para verificar a consistência dos dados e inferir ajustes. Por fim, estatísticas inferenciais incluem técnicas para medir relações entre variáveis específicas (por exemplo, análise de regressão).

Para efeito desta tese, adota-se a realização de *workshops* como forma de análise qualitativa e quantitativa dos dados, por meio da técnica de grupo focal, que tem como objetivo a coleta de dados por meio de interações em grupo, ao se discutir um tópico especial sugerido pelo pesquisador. Trata-se de um método que busca obter profundo conhecimento das percepções, opiniões e atitudes dos participantes, consistindo basicamente na reunião de especialistas a fim de discutir o problema em questão (VALENTIM, 2005).

A discussão é conduzida pelo moderador, que possui tarefas específicas em cada uma das etapas: preparação, debate, e análise dos resultados. Contudo, Hart (1989) destaca a dificuldade de se obter a opinião conjunta de vários especialistas e conseguir uma opinião de consenso. Deste modo, dependendo do conhecimento que se quer extrair, técnicas diferentes devem ser utilizadas, como: entrevistas estruturadas, discussões organizadas sobre questões pré-determinadas e a realização de comitês de especialistas com a finalidade de demonstrar suas técnicas, habilidades e saberes (*workshops*). O protocolo é detalhado e descrito no Capítulo 6, ao se aplicar o método de modelagem de emissões de GEE e energia desenvolvido nesta tese.

2.6 Considerações finais do capítulo

Este Capítulo buscou apresentar as naturezas, os objetivos e os procedimentos de pesquisa convencionalmente abordados em estudos científicos. A partir disso, os elementos que são adotados na tese foram estruturados e descritos metodologicamente, justificando-se a sua adoção. Ademais, abordou-se os protocolos de coleta de dados e de análise de

consistência dos resultados, justificando a realização de um *workshop* para a validação de premissas e hipóteses bem como de cenários prospectivos. Para a realização do evento, sugeriu-se a técnica de grupo focal. Portanto, o Capítulo tem o propósito de servir como base metodológica para as abordagens utilizadas nos capítulos seguintes. O próximo Capítulo expõe a pesquisa bibliográfica sistemática em modelagem de uso da energia e emissões de GEE para a linha de base e projeções.

3 MODELAGEM DE CENÁRIOS DE ENERGIA E EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

Este Capítulo tem como propósito identificar como tem sido abordada a modelagem de cenários prospectivos tanto em termos conceituais como metodológicos. Busca-se, portanto, confirmar na literatura a existência das lacunas no conhecimento a serem preenchidas pelo método proposto nesta tese, bem como o de identificar oportunidades de aprimoramento de métodos existentes.

3.1 Conceitos

Esta subseção aborda os principais conceitos que norteiam a modelagem de cenários prospectivos de energia e GEE.

3.1.1 Capacidade

De acordo com Goes (2016), a infraestrutura de transporte possui uma capacidade finita, ou seja, um número máximo de usuários que podem utilizá-las em um determinado intervalo de tempo.

Convencionalmente, a capacidade de fluxo de uma via é expressa em veículos por hora (veíc/h), mediante a conversão das diversas categorias de veículos existentes no fluxo para equivalentes em um veículo padrão. Essa unidade pode ser estendida a diversos modos, adaptando-se os coeficientes (por exemplo, de automóveis para vagões). No modo rodoviário, a capacidade básica de uma via significa a capacidade considerando um comportamento de condução normal por unidade de tempo e por faixa de rolamento (WANG, 2014).

3.1.2 *Cenários prospectivos*

Um modelo de cenários de consumo energético e de emissões busca estimar, a partir de um cenário base, a evolução do consumo de energia e suas conseqüentes emissões em dada localidade. Para isso, esforço multissetorial é necessário para definir premissas e hipóteses, visando explicar o comportamento de certas variáveis ao longo do tempo.

De acordo com DHL (2012), os cenários têm como objetivo melhorar a qualidade do pensamento estratégico, o diálogo a partir das análises e a geração de alternativas. Eles construtivamente desafiam pensamento crítico com intuito de evitar surpresas e incorporar novos conhecimentos, perspectivas e *insights*. Em suma, a construção de cenários permite que novas estratégias surjam e aquelas existentes sejam testadas e aprimoradas, de forma a criar um ambiente resiliente, capaz de se adaptar às mudanças, permitindo a tomada de decisão com discernimento, clareza e confiança para atingir metas mesmo em um futuro incerto.

3.1.3 *Forecasting e backcasting*

Forecasting significa estimar os estados futuros de algum elemento do presente ou passado (ULLAH, 2017). Essa projeção é convencionalmente utilizada para avaliar cenários de emissões de GEE e energia no longo prazo (por exemplo, 2030 e 2050), bem como para avaliar diferenças de mitigação entre os cenários (usualmente com níveis de ambição política distintos).

O *Backcasting* é uma abordagem para explorar os termos de longo prazo designados para um futuro desejável (ROBINSON, 1982). A análise inicia a partir de um sistema, no qual os alvos futuros têm sido atingidos e processados a partir do futuro desejado, descrevendo as rotas que percorrem o estado do sistema. Em certo sentido, é adotada a abordagem de previsão e análise de potencial tecnológico, que impede o futuro das condições atuais.

Essa projeção é convencionalmente utilizada para avaliar como atender os compromissos internacionais (NAMA e NDC) de emissões de GEE no longo prazo.

3.1.4 *Abordagens*

Os modelos para a construção dos cenários prospectivos podem ser por meio das abordagens *Top-down* e/ou *Bottom-up*, utilizadas para examinar os vínculos entre a economia e os setores emissores de GEE específicos, como o sistema de transportes.

De modo geral, a abordagem *Top-down* é um modelo que avalia o sistema a partir de variáveis econômicas agregadas, aplicando a teoria macroeconômica e técnicas econométricas aos dados históricos. Por sua vez, a abordagem *Bottom-up* é um modelo desagregado que considera opções tecnológicas ou políticas específicas de mitigação de mudanças climáticas, em nível microeconômico (IPCC, 2001). Especificamente, no setor de transportes, a abordagem *Top-down* tem por característica estimar as emissões de GEE por meio do consumo de energia agregado por fonte, coletado de balanços de energia ou estimados e fatores de emissão *default* do IPCC, permitindo apenas uma visão genérica do uso de cada fonte de energia.

A abordagem *Bottom-up* tem por característica quantificar e identificar o consumo energético de forma desagregada, permitindo assim a gestão individualizada do uso de cada fonte de energia. Portanto, especificamente para o cálculo do consumo de energia, faz-se necessária a identificação de cinco principais conjuntos de dados para cada tipo de veículo considerando o ano de fabricação, tecnologia e fonte de energia: (1) frota circulante; (2) intensidade de uso; (3) coeficiente de consumo; (4) ocupação média; e (5) consumo por tipo de fonte de energia (GONÇALVES e D'AGOSTO, 2017).

Uma abordagem alternativa é a ASIF (*Activity-Structure-Intensity-Fuel*), introduzida pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*) em seu primeiro relatório em 1991. Nessa abordagem, a estimativa das emissões é realizada com base em quatro conjuntos principais de dados para cada modo de transporte: (1) o momento de transporte; (2) a divisão modal; (3) a intensidade energética e a divisão por tipo de combustível; e (4) conteúdo de carbono de cada fonte de energia (SCHIPPER *et al.*, 2000).

3.1.5 Níveis (*tier*)

Existem três níveis principais de protocolos para estimar o consumo energético e emissão de GEE do setor de transportes (PENMAN *et al.*, 2006):

- *Tier 1*: aplica uma relação linear simples entre dados de atividade e fatores de emissão *default* fornecidos pelo IPCC (obtidos de forma agregada – *Top-down*);
- *Tier 2*: utiliza fatores de emissão com teor de carbono local (da energia utilizada) para estimativa do CO₂ ou utilizam FE *default*, porém desagrega as emissões por tecnologia e fonte energética para os gases não-CO₂ (CH₄ e N₂O, no caso do setor de transportes);
- *Tier 3*: Segue abordagem *Bottom-up*, considerando fatores de emissão locais e específicos da tecnologia e fonte energética (CH₄ e N₂O).

Recomenda-se que, em caso de disponibilidade de dados, o uso da abordagem Tier 2 para estimar as emissões de CO₂ e, da abordagem Tier 3, para os GEE CH₄ e N₂O, pois quanto maior o uso de fatores locais e específicos, bem como a desagregação da análise, mais precisos serão os resultados.

3.1.6 *Estimativa do CO₂e*

Para uma análise da emissão total de GEE, é necessário que os diferentes gases estejam em uma base equivalente ao CO₂ (CO₂e). Para transformar os gases não CO₂ em CO₂e, deve-se empregar conjunto de fatores para indicar a importância de cada um em relação ao CO₂. O procedimento mais utilizado é o GWP, convencionalmente calculado sobre um período de 100 anos, dado o tempo de vida de gás na atmosfera. Contudo, o GWP dos gases, publicado pelo IPCC, tem variado desde a segunda publicação (SAR), em 1995 (IPCC, 1995), em decorrência da variação da concentração do gás ao longo do tempo na atmosfera. A partir de então, ocorreu a terceira (TAR), a quarta (AR4) e a quinta (AR5) publicação (SIMS *et al.*, 2014). Ademais, um novo conjunto de pesos foi elaborado, o potencial de temperatura global (GTP), com o intuito verificar a contribuição de cada gás à temperatura global no mesmo período, porém aferindo a radiação que cada gás retém na atmosfera (SOLOMON *et al.* 2007; MCTI, 2016).

3.2 **Revisão Sistemática em cenários energéticos e emissões atmosféricas**

Nesta subseção, busca-se estruturar a pesquisa bibliográfica sistemática, indicando o método de pesquisa e as categorias consideradas para síntese dos estudos. Após isso, faz-se a análise dos estudos inclusos, bem como a conclusão.

3.2.1 *Procedimento da revisão bibliográfica sistemática*

Optou-se por conduzir uma pesquisa bibliográfica sistemática com o objetivo de identificar como os pesquisadores correlacionam as premissas/hipóteses (quantitativas e/ou qualitativas) com os parâmetros macroeconômicos para elaboração de inventários nacionais de energia e emissão para o setor de transportes. Portanto, busca sintetizar estudos sobre um tópico emergente no intuito de justificar um resultado ou conclusão.

Assim, para atingir o objetivo da pesquisa, os dados foram alocados em 14 categorias (e subcategorias) que buscam sintetizar os principais trabalhos em modelagem de energia e GEE. As categorias foram obtidas com base em uma revisão preliminar realizada em relatórios técnicos, artigos científicos, além da experiência do analista. A Tabela 3.1 apresenta as categorias e os parâmetros a serem identificados na pesquisa.

Tabela 3.1: Procedimento de pesquisa bibliográfica sistemática adotado no estudo

Categoria	Parâmetros a serem identificados
Delimitação geográfica	País analisado
Periódico	-
Ano da publicação	-
Autor	-
Propósito do cenário	-
Delimitação temporal	Histórico
	Período da projeção
Variáveis macroeconômicas	Não menciona
	PIB, população, preço combustível etc.
Modos de transporte (Atividade)	Aéreo (passageiros, carga ou ambos)
	Aquático (passageiros, carga ou ambos)
	Dutoviário
	Ferroviário (passageiros, carga ou ambos)
	Rodoviário (passageiros, carga ou ambos)
Nível da abordagem	<i>Top-down (tier 1)</i>
	<i>Bottom-up (tier 1)</i>
	<i>Bottom-up (tier 2)</i>
	<i>Bottom-up (tier 3)</i>
Forma de calibração	Não menciona
	Utiliza parâmetros macroecônimos ou outros métodos
Outputs	Energia
	Emissão
Método/ferramenta utilizada	-
Pontos fortes	-
Pontos fracos	-

Fonte: Elaboração própria.

A identificação dos trabalhos é conduzida com base no grupo de palavras-chave, definido a partir de uma pesquisa preliminar que considerou relatórios técnicos e artigos científicos sobre o tema. Utilizou-se a base de dados *Web of Science*, visto ser uma base ampla de periódicos indexados e que compreende outras bases de indexação. Assim, utilizou-se a

seguinte combinação de palavras-chave: (*scenario** AND (*GHG* OR *greenhousegas* OR *CO₂*) AND (*backcast** OR *forecast**) AND *transport**). Os operadores lógicos “ou” e “e”, foram utilizados para facilitar a combinação dos critérios de identificação e seleção dos trabalhos.

Dessa forma, buscou-se por estudos que elaboraram cenários (*scenario*) prospectivos de uso de energia (*energy*) e/ou emissões de GEE (GHG) no setor de transportes (*transport*), seja para atender uma meta setorial ou nacional (*backcasting*) e/ou para identificar o impacto em médio ou longo prazo (*forecast*) de opções de mitigação, investimentos ou simplesmente a evolução do setor. Como resultado dessa busca, tem-se os artigos “Identificados”.

O caminho utilizado para buscar as palavras-chave foi aplicado no título, palavras-chave e no resumo dos artigos. Considerou-se 2010 a 2020 como o período para realização da pesquisa visto ser um período capaz de contemplar o estado da arte sobre o tema. Por se entender que o tema é importante para a economia de qualquer país, não foi adotada uma delimitação específica em termos geográficos.

Os critérios para seleção dos artigos identificados são baseados na leitura de seus títulos e resumos, em que foi analisada a aderência do conteúdo à temática de inventários de emissões e cenários futuros de transportes. Assim, a partir da lista de artigos selecionados, é realizada a leitura completa deles, seguindo os seguintes critérios para inclusão:

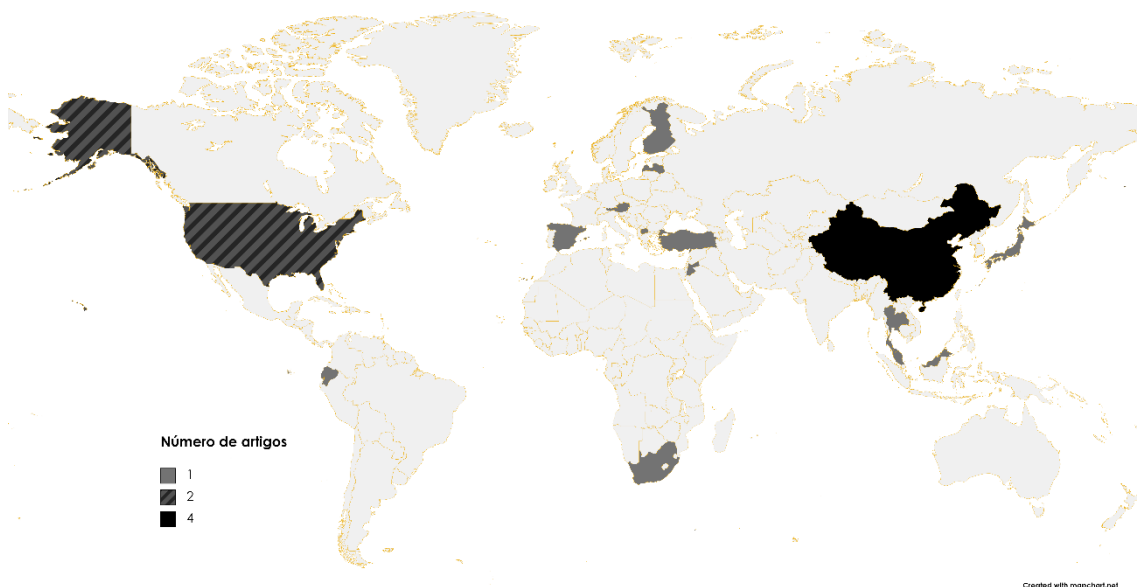
- Modela GEE, considerando uma linha de base e pelo menos um cenário futuro;
- A abrangência nacional para a modelagem;
- O estudo detalha o método e a aplicação do modelo em nível setorial, o que permite obter informações como: propósito do cenário, variáveis macroeconômicas, modo e

tipo de atividade, fonte de dados, nível da abordagem (e nível de abordagem no padrão IPCC), forma de calibração, e variáveis de saída do modelo.

3.2.2 Aplicação da revisão bibliográfica sistemática

Na Etapa 1, foram identificados 89 artigos científicos. Após a leitura do resumo, foram selecionados 33 artigos e, após a leitura completa, 17 artigos inclusos. A partir disso, foi aplicado o método *snowball* que, segundo Thomé et al. (2016), consiste na análise dos estudos referenciados pelos autores que citam esses artigos. Isto posto, foram identificados cinco potenciais estudos e, a partir da leitura completa deles, dois foram inclusos. Dessa forma foram analisados e considerados 19 artigos no total.

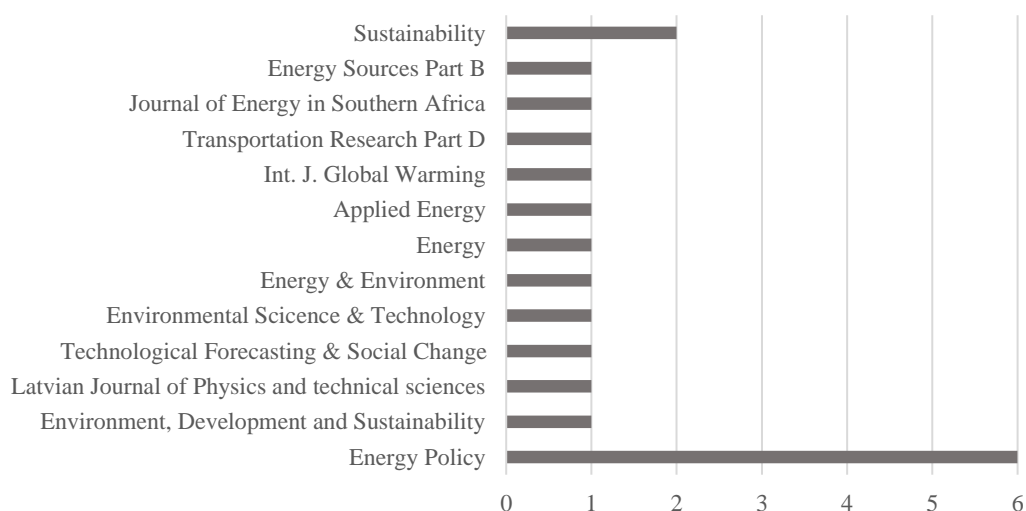
A Figura 3.2 evidencia a abrangência geográfica dos estudos inclusos na análise bibliográfica, sendo esses concentrados na China e Estados Unidos, com quatro e dois artigos, respectivamente.



Fonte: Elaboração própria

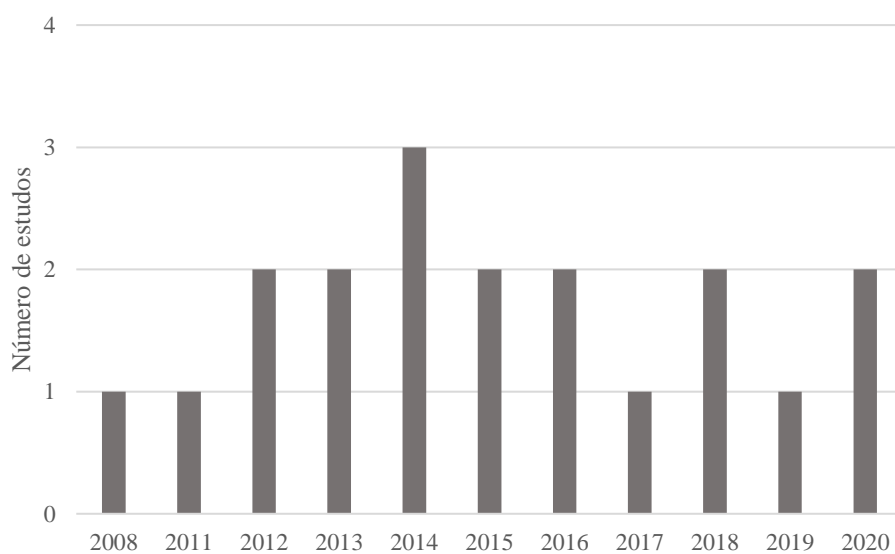
Figura 3.1: Abrangência geográfica dos 19 artigos inclusos

Em relação aos periódicos dos estudos (Figura 3.2), nota-se uma concentração de periódicos cujo escopo refere-se à energia e à mudança climática, incluindo temas relacionados à sustentabilidade (aspectos econômicos, ambientais e sociais). Já em alusão ao ano de publicação (Figura 3.3), 2014 foi o ano com maior concentração de artigos publicados (3 artigos), seguidos dos anos de 2012, 2013, 2015, 2016, 2018 e 2020 com dois artigos cada.



Fonte: Elaboração própria

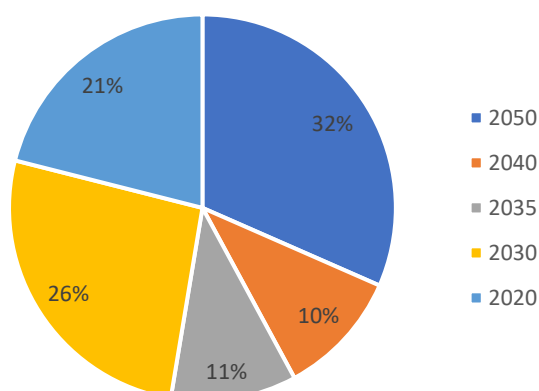
Figura 3.2: Distribuição dos trabalhos por periódico.



Fonte: Elaboração própria

Figura 3.3: Abrangência temporal dos artigos inclusos na revisão.

No que concerne ao horizonte de análise dos cenários, a Figura 3.4 mostra que o ano final de 2050 (6 ocorrências) é mais frequente nos cenários, o que aponta que as pesquisas buscam avaliar caminhos para manter o aquecimento global bem abaixo dos 2°C, preferencialmente abaixo de 1,5°C, em relação à temperatura estimada pré-revolução industrial. O segundo ano mais frequente é o de 2030 (5 ocorrências), o que mostra que os estudos buscam caminhos atingir as metas de mitigação, nesse caso, para o atendimento das NDCs. No caso do ano de 2020 (com 4 ocorrências), verifica-se a preocupação em avaliar caminhos para o cumprimento das NAMAs.



Fonte: Elaboração própria

Figura 3.4: Ano final dos cenários.

A Tabela 3.2, por conseguinte, sumariza os artigos inclusos na revisão sistemática, considerando as categorias de análise definidas. Para efeito dessa análise, optou-se por considerar o percentual de referência de cada elemento em relação ao total, de forma a realizar uma avaliação qualitativa desses percentuais considerando a literatura e a experiência do autor.

Tabela 3.2: Síntese dos artigos incluídos na revisão.

Autor	País	Propósito do(s) cenário(s)	Delimitação temporal	Variáveis macroeconômicas	Modos de transporte (atividade)	Fonte de dados	Método/ferramenta utilizada	Nível da abordagem (Nível IPCC)	Forma de calibração	Saída
Azam <i>et al.</i>	Malásia	Testar hipóteses	2012 - 2040	Não menciona	Rodoviário (pass. e carga)	<i>Ministry of Transport Malaysia</i> (Governamental) e artigos	LEAP	Bottom-up (Tier 1)	Energia (Estudo IEA)	CO ₂ , CO, NO _x , NMVOC
Kay <i>et al.</i>	Estados Unidos	Testar hipóteses	2010 - 2040	Não menciona	Rodoviário* (pass. e carga)	-	VISION	Bottom-up (-)	Não menciona	CO ₂ e
Klavs e Rekis	Letônia	Atingir meta de emissões	2005 - 2030	PIB e População	- (pass. e carga)	-	Markal	Bottom-up (Não informa)	Não calibrou	CO ₂ e
Liimatainen	Finlândia	Testar hipóteses	1995 - 2030	PIB	Rodoviário (pass. e carga)	Estatística nacional	Delphi + modelo quantitativo	ASIF (Tier 2)	Não calibrou	CO ₂
Trail	Estados Unidos	Testar hipóteses	2010 - 2050	Não menciona	- (pass. e carga)	-	Markal	Bottom-up (Tier 2)	-	CO ₂ , NO _x , O ₃ e MP
Travesset-Baro	Andorra	Testar hipóteses	2013-2050	PIB e preço do diesel	Rodoviário (Passageiros)	-	-	Bottom-up (-)	Não calibrou	CO ₂
Wen	China	Testar hipóteses	2010-2030	PIB	- (pass. e carga)	Estatística nacional	LEAP	Bottom-up e Top-down (Tier 1)	Top-down	CO ₂ e
Dedinec <i>et al.</i>	Macedônia do Norte	Atingir meta de emissões	2010-2020	Não menciona	Rodoviário (Passageiros)	Estatística nacional	-	Bottom-up (Tier 1)	Não calibrou	CO ₂
Pongthanaishawan	Tailândia	Testar hipóteses	2008-2030	PIB, PIB per capita, preço do petróleo bruto	Rodoviário (pass. e carga)	Estatística nacional	-	Bottom-up (Tier 1)	Energia	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CO ₂ e (SAR)
Ashina	Japão	Atingir meta de emissões	2005-2050	PIB e População	Rodoviário, Aéreo, Ferroviário e Aquático (pass. e carga)	Estatística nacional	-	Bottom-up (-)	Energia e momento de transporte	CO ₂
Jaber <i>et al.</i>	Jordânia	Testar hipóteses	2011-2020	PIB e População	Rodoviário (passageiros)	Estatística nacional	-	Bottom-up (-)	Energia	CO ₂
Ahjum <i>et al.</i>	África do Sul	Testar hipóteses	2000-2050	PIB e renda familiar	Rodoviário (pass. e carga)	Estatística nacional	SATIM model	Bottom-up (-)	Energia	CO ₂ e
Han <i>et al.</i>	China	Alocar cotas de emissão de carbono	2002-2020 (2002-2015 sendo o histórico)	PIB	Rodoviário (pass. e carga)	Estatística nacional	-	Bottom-up (Tier 1)	Não calibrou	CO ₂
Korkmaz e Akgungor	Turquia	Avaliação do modelo proposto	1970-2035	PIB per capita	- (pass. e carga)	Estatística nacional	Algoritmo de Polinização de Flores Modificado	Top-down (Tier 1)	Não calibrou	CO ₂
Llano <i>et al.</i>	Espanha	Testar hipóteses	1995-2030	PIB	Aéreo, Aquático,	Estatística nacional e internacional	Modelo gravitacional	ASIF (Tier 2)	Não calibrou	CO ₂ e

Autor	País	Propósito do(s) cenário(s)	Delimitação temporal	Variáveis macroeconômicas	Modos de transporte (atividade)	Fonte de dados	Método/ferramenta utilizada	Nível da abordagem (Nível IPCC)	Forma de calibração	Saída
					Ferrovário e Rodoviário (carga)		(Atividade) e método proposto na norma EM 16258 (Emissões)			
Gonzalez <i>et al.</i>	Equador	Analisar a demanda energética futura por veículo rodoviário**	2012,2016-2035	Considerou o crescimento tendencial com base nos últimos 10 anos	Rodoviário (pass. e carga)	Estatística nacional	LEAP	Bottom-up sem considerar atividade (-)	Não calibrou	CO ₂ e, MP ₁₀ e NO _x
Yu <i>et al.</i>	China	Entender a relação dos fatores de influência entre o crescimento da atividade aérea e suas emissões	1979-2050	PIB per capita e População	Aéreo (pass. e carga)	Estatística nacional, ICAO e IATA	Modelo baseado em Kaya e log-mean Divisia index model (LMDI)	Top-down (-)	Não calibrou	CO ₂
Han e Hayashi	China	Evolução tendencial	2000-2020 (2000-2005 para validação)	PIB per capita e População	Rodoviário (pass. e carga)	Estatística nacional	-	Bottom-up (Tier 1)	Não calibrou	CO ₂ , CH ₄ , CO, NMVOC, NO _x e SO ₂
Kloess e Muller	Áustria	Impacto da política de preços na penetração de veículos elétricos	2010-2050	PIB	Rodoviário - Transporte individual (automóveis) (passageiros)	-	-	Bottom-up e Top-down - sem considerar atividade (-)	Frota	CO ₂ e ciclo de vida

*não considera motocicletas; ** modo de transporte que corresponde a 90% da demanda de energia do setor

Em relação ao propósito do cenário, mais da metade (53%) dos trabalhos tiveram como objetivo principal testar hipóteses, em decorrência das possibilidades de medidas de mitigação do setor como: introdução de veículos alternativos (elétricos e híbridos); uso de biocombustíveis (bioquerosene, bio-óleo, etanol e biodiesel); maior participação de modos de alta capacidade; ganho em eficiência energética etc. Para os demais propósitos, verifica-se que 16% dos artigos se preocuparam em avaliar caminhos para o atendimento das NDCs e para manter o aquecimento global bem abaixo dos 2°C, preferencialmente abaixo de 1,5°C, em relação à temperatura estimada pré-revolução industrial. Por fim, os outros trabalhos buscaram pontos específicos como: identificar o impacto do cenário prospectivo tendencial do setor; testar o método proposto; avaliar o impacto da política; analisar os fatores de influência entre o crescimento da atividade aérea e suas emissões etc.

As variáveis macroeconômicas consideradas para projeção dos cenários da atividade de transporte levaram em consideração o PIB em todas as ocorrências para o transporte de carga e, para o transporte de passageiros, o PIB, PIB *per capita* e população. Infere-se que esse resultado decorre da elasticidade histórica entre PIB e atividade de carga nos países, também verificado no Brasil (EPE, 2016; Gonçalves e D'Agosto, 2017), enquanto que no transporte de passageiros, verifica-se que a atividade de transporte sofre maior influência do crescimento populacional em um cenário de estabilidade política e econômica, porém em cenários de instabilidade, o crescimento populacional não necessariamente explica a variação da atividade de transporte (por exemplo, no caso de crescimento populacional com retração econômica), por essa razão, a literatura aponta a necessidade de calibrar os modelos com variáveis distintas. No entanto, 21% dos trabalhos não informaram as variáveis macroeconômicas utilizadas para a projeção da atividade do setor.

Em complemento, 63% dos artigos modelaram o transporte de passageiros e de carga. É oportuno salientar que os trabalhos de Liimatainen *et al.* (2014) e Llano *et al.* (2018) modelaram apenas o transporte de carga e os trabalhos de Travesset-Baro *et al.* (2016), Dedinec *et al.* (2013), Jaber *et al.* (2012), Han e Hayashi. (2008) e Kloess e Muller (2011) modelaram apenas o transporte de passageiros.

Ainda nesse contexto, Ashina *et al.* (2012) modelaram quatro modos (aéreo, aquático, rodoviário e ferroviário) para carga e passageiros, sendo o único trabalho que modelou de forma desagregada mais do que um modo de transporte. Apesar de Klavs e Rekis (2016), Trail *et al.* (2015), Wen *et al.* (2014) e Korkmaz e Akgungor (2019) afirmarem ter modelado o setor de transporte, trataram as premissas, análises e cenários de forma agregada, o que impossibilita aferir os elementos considerados na modelagem de cada modo, bem como as analogias consideradas. O transporte dutoviário não foi mencionado em nenhum artigo da revisão, além disso, não houve explicação dos estudos acerca da razão para essa ausência desse modo, evidenciando uma lacuna nesse aspecto.

A maioria dos trabalhos (63%) modelou somente o modo rodoviário, notadamente pela maior participação do modo na matriz de transporte dos países, sua alta intensidade energética e dada a complexidade da quantidade de veículos, tecnologias e fontes de energia. Kay *et al.* (2014) não modelou motocicletas em seu estudo, comportamento também observado em outros estudos como Klavs e Rekis (2016), Trail *et al.* (2015), e Kloess e Muller (2011). Por fim, apenas o trabalho de Yu *et al.* (2020) modelou exclusivamente o modo aéreo, por ser o modo mais intensivo em energia e com maior pegada de carbono, porém, não detalhou os resultados por atividade (passageiros e carga), dado que considerou como unidade representativa a t-km, aplicando um peso médio os passageiros transportados e somou-os a carga transportada.

Observa-se que 63% dos artigos consideraram estatísticas nacionais para a projeção das variáveis, uma vez que esses dados já estavam discretizados e disponíveis por instituições nacionais. Isso significa que não houve alocação de recursos para estimar a linha de base e o histórico de atividade de transporte, consumo energético e emissões.

Quanto à ferramenta de modelagem (no caso em que são citadas), as mais utilizadas foram LEAP e MARKAL, com 16% e 11% da frequência de observação cada, respectivamente. Outras ferramentas identificadas foram VISION e SATIM model (5% cada), enquanto os 63% restantes não mencionaram uma ferramenta específica de modelagem. Nesse caso, infere-se que foram modeladas com base em planilhas eletrônicas de elaboração própria, utilizando abordagens identificadas na literatura, visto que 79% mencionaram a utilização da abordagem *Bottom-up* para modelar os cenários. Korkmaz e Akgungor (2019) e Yu et al. (2020) utilizaram a abordagem *Top-down* para modelar o setor de transportes, enquanto Liimatainen *et al.* (2014) e Llano *et al.* (2018) consideraram a abordagem ASIF.

Apenas os estudos de Kloess e Muller (2011) e Wen *et al.* (2014) utilizaram tanto a abordagem *Bottom-up* como a *Top-down* na modelagem com o intuito de calibrar os resultados, procedimento também defendido nesta tese. Porém, no estudo de Kloess e Muller (2011) modela apenas o transporte individual motorizado (automóveis) e não consideram a atividade de transportes, utilizando como parâmetro da abordagem *Top-down* apenas a evolução da frota circulante e, sem apresentar claramente os dados, possivelmente a energia.

Ainda em relação à calibração dos resultados, 26% dos trabalhos calibraram os resultados da abordagem *Bottom-up* com o consumo energético de estimativas nacionais independentes, com exceção do estudo de Azam *et al.* (2016), que utilizou a demanda

energética estimada pela Agência Internacional de Energia (IEA). Destaca-se que mais da metade dos estudos (52%) não calibraram os resultados da abordagem *Bottom-up*.

Em relação as variáveis de entrada (*inputs*) das abordagens, observa-se que na *Top-down*, foram considerados o momento de transporte e fatores de emissão agregados. Enquanto na ASIF, além dos *inputs* anteriores é considerada também a intensidade energética e a participação do modo de transporte na atividade total. Por fim, na abordagem *Bottom-up*, as variáveis consideradas foram: intensidade de uso, coeficiente de consumo, veículos novos, taxa de sucateamento e fatores de emissão específicos (por exemplo, g de CH₄/km por tipo de veículo e ano de fabricação). Porém, parte dos estudos apresentaram premissas generalistas, como, por exemplo, o trabalho de Azam *et al.* (2016), que considerou a mesma intensidade de uso para todos os tipos de veículo, independente da atividade, tecnologia e do ano de fabricação.

Quanto ao nível da abordagem metodológica (IPCC), sete trabalhos (37%) utilizaram o *tier 1*, abordagem com menor sensibilidade, pois utiliza fatores de emissão *default* propostos pelo IPCC. Liimatainen *et al.* (2014), Trail *et al.* (2015) e Llano *et al.* (2018) utilizaram a abordagem *tier 2* para estimar as emissões, considerando fatores de emissão próprios do país. Ainda, 47% dos trabalhos não declararam a abordagem utilizada.

No contexto dos GEE, 42% dos artigos modelaram apenas as emissões de CO₂, ou seja, não estimaram as emissões de CH₄ e N₂O ou outros gases com GWP. A provável justificativa é devido à complexidade de se modelar o consumo energético para as diferentes unidades dos fatores de emissão em abordagens *Bottom-up* e o impacto reduzido das emissões de CH₄ e N₂O na composição do CO₂e, como aferido nos estudos do MCTI (2016) e MCTI (2020). Dentre os estudos, 53% consideraram CO₂e na modelagem, porém apenas o estudo de Pongthaisawan *et al.* (2013) mencionou qual

índice de GWP foi considerado. Apenas o estudo de Kloess e Muller (2011) consideraram as emissões do ciclo de vida, mas destaca-se que, esse estudo é o que apresenta o menor escopo, modelando apenas o transporte individual motorizado e considerando apenas automóveis.

Apenas três artigos estimaram as emissões de poluentes atmosféricos. Azam *et al.* (2016) consideraram as emissões de CO, NO_x, NMVOC; enquanto Trail *et al.* (2015) modelaram NO_x, O₃ e MP e Han e Hayashi (2008) consideraram CO, NMVOC, NO_x e SO₂.

Quanto ao critério para definição de premissas e hipóteses, nove artigos as definiram com base em uma pesquisa bibliográfica narrativa. Destes, apenas três estudos (DEDINEC *et al.*, 2013; WEN *et al.*, 2014; LIIMATAINEN *et al.*, 2014) consultaram também especialistas para selecionar as premissas e hipóteses do conjunto levantado durante a pesquisa na literatura, procedimento também defendido nesta tese. No entanto, não há indícios que o histórico e diagnóstico do setor foi apresentado e que algum tipo de nivelamento foi realizado.

O trabalho de Ashina (2012) selecionou e definiu o grau de penetração das premissas e hipóteses necessárias para o atendimento das metas de emissões consideradas no cenário (*backcasting*). O artigo de TRAIL *et al.* (2015) utilizou as premissas dos cenários de emissões desenvolvidos pelo IPCC, enquanto três artigos se basearam em estudos/planos/metastatais governamentais.

3.3 Considerações finais do capítulo

Este Capítulo buscou verificar na literatura a existência das lacunas no conhecimento exploradas na subseção 1.1., tendo como foco a modelagem de cenários prospectivos tanto em termos conceituais como metodológicos.

Diante disso, as considerações levadas a efeito evidenciam a falta de métodos que: (1) detalhe o processo de elaboração de cenários; (2) estimem a linha de base, bem como histórico; (3) considerem todos os modos, incluindo o transporte ativo e o modo dutoviário; (4) utilizem a abordagem *tier 3* para os GEE CH₄ e N₂O; (5) que instruem e posteriormente consultem *stakeholders*; e (6) calibrem o modelo *Bottom-up* com a estimativa da atividade de transporte e demanda energética (ASIF e/ou *Top-down*) específica para o setor de transportes.

Os resultados indicam que 63% dos trabalhos modelaram apenas o modo rodoviário, essa escolha deve ser vista com cautela uma vez que os modos de transporte se comportam de maneira sistêmica. Isso pode ser verificado quando a diminuição da demanda de um modo específico não necessariamente implica na redução da atividade desse modo em decorrência da diminuição da atividade econômica como um todo, mas da migração da demanda para outro modo da matriz de transporte. Essa sensibilidade só é manifestada ao se modelar todos os modos concomitantemente, inclusive o rodoviário no caso do transporte de carga e o transporte ativo no de passageiros. Além disso, mesmo quando considerado apenas o modo rodoviário, veículos como motocicletas não foram incluídos e analisados.

Para confirmar essa lacuna no conhecimento, pretende-se verificar a base de métodos e ferramentas de energia e GEE por meio de uma nova revisão. Portanto, o Capítulo 4 apresenta a pesquisa documental realizada, buscando identificar se há algum método que preencha as lacunas identificadas na pesquisa bibliográfica sistemática deste capítulo.

4 BASE DE MÉTODOS E FERRAMENTAS DE ENERGIA E EMISSÕES ATMOSFÉRICAS EM TRANSPORTES

Conforme abordado na subseção 2.2.3, adota-se uma pesquisa documental no intuito de levantar os métodos e/ou ferramentas disponíveis e utilizadas em relatórios internacionais de instituições selecionadas. O objetivo principal deste Capítulo é identificar a abrangência e limitações de cada método/ferramenta para propor aplicações e aperfeiçoamentos

Como forma de complementar os resultados da pesquisa bibliográfica sistemática e os confrontar com levantamentos preliminares de instituições relacionadas ao tema (IEA, EPA, ITF, GIZ etc.), adotou-se como critério o estudo que contemple a maior base de ferramentas para modelar atividade, energia e emissões de GEE em transportes, abordando os métodos e ferramentas com maior nível de detalhamento do que o observado nos artigos analisados na pesquisa sistemática do Capítulo 3.

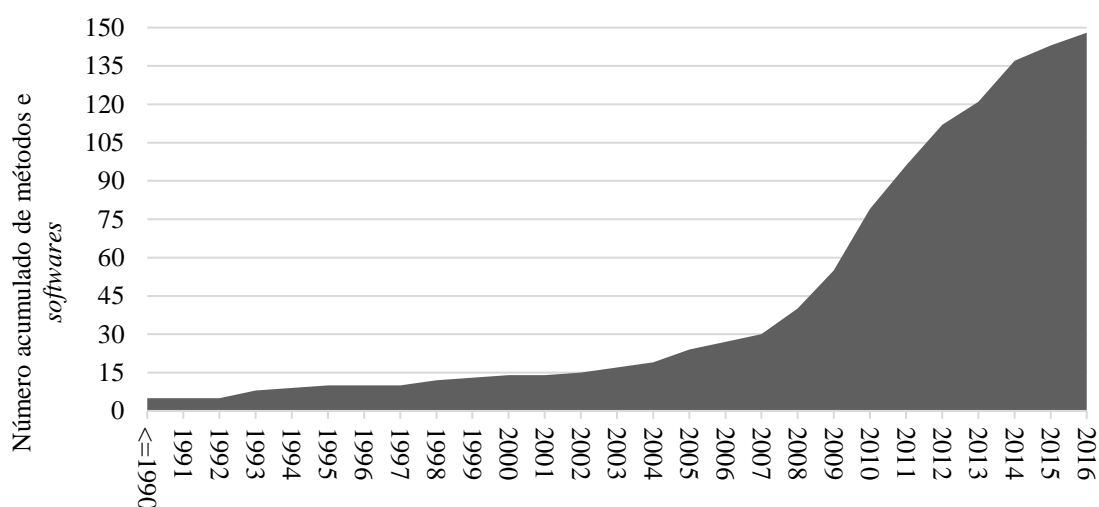
4.1 Pesquisa documental: fonte de dados

Na pesquisa documental, identificou-se um conjunto de *softwares*/métodos sintetizados pela iniciativa de Parceria para Transporte Sustentável de Baixo Carbono (SLoCaT). A parceria SLoCaT promove a integração do transporte sustentável em políticas globais de desenvolvimento sustentável e mudança climática. O SLoCaT consiste em uma parceria de mais de 90 organizações, como organizações não governamentais (ONGs), fundações, academia, setor privado, organizações multilaterais e bilaterais de desenvolvimento e representantes da Organização das Nações Unidas (ONU).

De acordo com a Parceria SLoCaT (2017), o setor de transportes historicamente tem recebido menos atenção do que outros setores para fontes de financiamento climático. Desta forma, para avaliar as metodologias disponíveis, a Parceria SLoCaT compilou uma avaliação qualitativa detalhada de 150 métodos, guias e *softwares* de emissão de GEE,

que abrangem os modos de transporte e incluem metodologias de transporte de passageiros e carga.

O desenvolvimento da metodologia de cenários e emissão de GEE é um processo contínuo, com novos *softwares* sendo adicionadas a cada ano, como apresentado na Figura 4.1.



Fonte: adaptado de SLoCAT (2017)

Figura 4.1: Evolução do número de métodos e ferramentas de cenários e emissão de GEE.

Observa-se o crescimento acentuado a partir de 2007, podendo indicar uma preocupação crescente dos pesquisadores e instituições sobre como atender as NAMAs e NDCs, bem como identificar formas de estimar os impactos de diferentes estratégias e níveis de ambições.

Diante disso, optou-se por realizar uma triagem dos 150 métodos, guias e *softwares* expostos na SLoCAT, visto que nem todos estão aderentes ao propósito desse estudo. Do conjunto, 50% têm como objetivo a análise estratégica da política de transporte (por exemplo, NAMA e NDC), 25% fazem uma avaliação das emissões em uma abordagem

multissetorial, 23% focam no inventário de emissões do setor de transportes e 2% possuem outros objetivos.

Quanto ao tipo de avaliação, 45% fazem projeção de cenários, 19% fazem apenas uma avaliação *ex-post*¹, 17% apenas a avaliação *ex-ante*², 17% fazem ambas as avaliações (*ex-ante* e *ex-post*) e 1% realiza outras avaliações. Assim, após análise preliminar das 150 ferramentas, foram adotados os seguintes critérios para selecionar as aderentes ao propósito desse estudo:

1. Consideram uma análise nacional para mais de um ano;
2. Contemplam o transporte de carga e o de passageiros;
3. Possuem protocolos de cálculos objetivos, editáveis e flexíveis (podendo adicionar diversas ações de mitigação).

Dessa forma, somente 21 ferramentas foram selecionadas para análise detalhada. Nesta etapa, avalia-se uma quantidade maior de elementos dos modelos, visando extrair o máximo de informações acerca da sua funcionalidade. Além disso, uma revisão documental é realizada para verificação de possíveis atualizações das ferramentas. Esse maior detalhamento se aplica neste Capítulo, visto que no Capítulo 3 havia a preocupação de identificar não apenas a ferramenta, mas o contexto da sua utilização, por exemplo, verificar se os modelos estimam o histórico, linha de base, fonte de dados e formas de calibração.

¹ É frequentemente usado em economia ou lei para descrever um resultado referentes a previsões futuras (Eichhorst e Bongardt 2015).

² É frequentemente usado em economia ou lei para descrever um resultado referentes a dados reais passados (Eichhorst e Bongardt, 2015).

4.2 Discussão

A análise das ferramentas é estratificada por categorias, assim como na pesquisa bibliográfica sistemática, que são expostas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Categorias e parâmetros a serem identificados

Categoria	Parâmetros a serem identificados
Nome do método/ferramenta	-
Ano da publicação	-
Desenvolvedor	-
Abordagem	<i>Top-down</i>
	<i>Bottom-up</i>
	Qualitativa
Função Primária	Avaliação Multissetorial
	Inventário de emissões do subsetor de transportes
	Análise estratégica da Política de Transporte
Tipo de avaliação	<i>Ex-ante</i>
	<i>Ex-post</i>
	<i>Forecasting</i>
	<i>Backcating</i>
Modo de transporte e tipos de veículos (rodoviário)	Transporte ativo
	Motocicletas
	Automóveis
	Táxi
	Ônibus
	Comerciais leves e caminhões
	Rodoviário (Análise agregada)
	Ferroviário
	Aéreo
	Aquático
Dutoviário	
Considera o ciclo de vida?	Sim (S)/Não (N)
Avaliação do impacto	Político
	Programas
Resultados	Frota
Resultados	-
Específico?	-
Gratuito?	-

Fonte: elaboração própria.

Apesar de apresentar alguns parâmetros semelhantes aos observados na pesquisa bibliográfica sistemática do Capítulo 3, tem-se uma ênfase maior em verificar o tipo de veículo considerado no modo rodoviário (cuja quantidade de variáveis de frota e energia

é superior aos demais modos), além disso, busca-se identificar o tipo de avaliação (*ex-ante*, *ex-post*, *forecasting* e *backcating*).

A síntese das ferramentas selecionadas nesta pesquisa documental é evidenciada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Ferramentas selecionadas

Ano	Desenvolvedor	Abordagem		Função Primária	Tipo de avaliação	Modo de transporte																Avaliação do impacto	Escopo de ação	Resultados	Outros outputs	Restrito a um país ou contexto? Livre acesso?				
		Top-down	Bottom-up			Qualitativa	Avaliação Multissetorial	Inventários	Analisa Política de Transporte?	Ex-ante	Ex-post	Forecasting	Backcasting	Transporte ativo	Motos	Autos	Táxi	Ônibus	C. Leve e caminhões	Rodoviário agregado	Ferroviário						Aéreo	Aquático	Dutoviário	Considera o ciclo de vida?
GHGenius model	2004	Natural Resources Canada		X		X			X	X					X									X	Político	Eficiência energética	Cenário BAU	-	S	S
Model	2013	UNECE		X			X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		Político	ASIF	Cenário BAU e mitigação estimada	Economia de energia	N	S
VIBAT	2007	Halcrow/University of Oxford		X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X								Político e de programas	Capacitação e ASIF	Cenário BAU e mitigação estimada	-	S	N
VISION Model	2004	Argonne National Laboratory		X		X		X	X					X	X	X								X	Programa	Relatório oficial, eficiência energética e energia	Cenário BAU e mitigação estimada	PA	S	S
SULTAN	2012	European Commission Directorate-General		X			X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X						Político	ASIF	Cenário BAU e mitigação estimada	PA e Economia de energia	N	S
ROADEO	2011	World Bank		X	X			X	X					X	X	X	X								Político	ASIF	Cenário BAU e mitigação estimada	PA e Economia de energia	N	S

Ano	Desenvolvedor	Abordagem		Função Primária	Tipo de avaliação	Modo de transporte																Avaliação do impacto	Escopo de ação	Resultados	Outros outputs	Restrito a um país ou contexto? Livre acesso?			
		Top-down	Bottom-up			Qualitativa	Avaliação Multissetorial	Inventários	Analisa Política de Transporte?	Ex-ante	Ex-post	Forecasting	Backcasting	Transporte ativo	Motos	Autos	Táxi	Ônibus	C. Leve e caminhões	Rodoviário agregado	Ferroviário						Aéreo	Aquático	Dutoviário
LEAP	2012	Stockholm Environment Institute	X	X			X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	-	ASIF	Cenário BAU e mitigação estimada	PA e Economia de energia	N	S
Global Transportation Roadmap Model	2012	ICCT	X				X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	Político	ASIF	Cenário BAU e mitigação estimada	PA	N	S
Study of Transport System in a Low Carbon Society	2011	Institution for Transport Policy Studies	X				X	X		X		X	X	X	X		X	X		X				Político	ASIF	Cenário BAU e mitigação estimada	Economia de energia	S	S
Markal	1983	ETSAP	X	X	X		X	X					X		X	X	X	X	X	X			X	Político e programa	ASIF	Cenário BAU e mitigação estimada	Economia de energia	N	N
GREET	1993	Argonne National Laboratory	X				X	X	X				X		X	X	X						X	-	Relatório oficial e energia	Cenário BAU	PA	S	S
TEEMP-Vehicle Replacement	2013	IGES/Clean Air Asia/ITDP	X				X	X	X			X	X	X	X	X	X						X	Político e frota	Capacitação, eficiência energética e energia	Cenário BAU e mitigação estimada	-	N	N

Ano	Desenvolvedor	Abordagem		Função Primária	Tipo de avaliação	Modo de transporte																Avaliação do impacto	Escopo de ação	Resultados	Outros outputs	Restrito a um país ou contexto? Livre acesso?			
		Top-down	Bottom-up			Qualitativa	Avaliação Multissetorial	Inventários	Analisa Política de Transporte?	Ex-ante	Ex-post	Forecasting	Backcasting	Transporte ativo	Motos	Autos	Táxi	Ônibus	C. Leve e caminhões	Rodoviário agregado	Ferroviário						Aéreo	Aquático	Dutoviário
TREMOD	1993	German Federal Environmental Agency	X			X		X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Programa	-	Cenário BAU	PA	S	N
Vehicle emissions prediction model (VEPM)	2008	NZ Transport Agency	X			X		X	X				X	X	X	X	X						X	Programa e frota	Relatório oficial, eficiência energética e energia	Cenário BAU	PA	S	S
Lifecycle emissions model	1993	University of California, Davis (Mark Delucchi)	X			X		X	X				X	X	X	X	X	X	X				X	Político	ASIF	Cenário BAU	PA	N	N
DREAM	2010	CEG at LBNL	X		X			X	X				X	X	X	X	X	X				X	-	ASIF	Cenário BAU e mitigação estimada	PA	S	S	
MESSAGE ¹	1979	IIASA	X	X		X		X	X				X	X	X	X	X	X	X			X	Político e programa	ASIF	Cenário BAU e mitigação estimada	Economia de energia	N	S	
GCAM - Transport Module (2013)	2013	PNNL	X		X			X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	Político	ASIF	Cenário BAU e mitigação estimada	Economia de combustíveis	N	S	

	Ano	Desenvolvedor	Abordagem		Função Primária	Tipo de avaliação	Modo de transporte																	Avaliação do impacto	Escopo de ação	Resultados	Outros <i>outputs</i>	Restrito a um país ou contexto? Livre acesso?				
			<i>Top-down</i>	<i>Bottom-up</i>			Qualitativa	Avaliação Multissetorial	Inventários	Análise Política de Transporte?	<i>Ex-ante</i>	<i>Ex-post</i>	<i>Forecasting</i>	<i>Backcasting</i>	Transporte ativo	Motos	Autos	Táxi	Ônibus	C. Leve e caminhões	Rodoviário agregado	Ferrovial	Aéreo						Aquático	Dutoviário	Considera o ciclo de vida?	
MOMO	2009	IEA		X				X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X	Político	ASIF	Cenário BAU e mitigação estimada	PA e economia de combustível	N	N
NATIONAL ENERGY MODELING SYSTEM	1994	Energy Information Administration	X	X				X								X		X	X	X	X	X				X	Programa	Relatório oficial e ASIF	Cenário BAU e mitigação estimada	PA e economia de combustível	S	N
TREMOVE model	1998	Transport & Mobility Leuven		X				X	X	X					X	X	X	X	X	X	X					X	Programa	Relatório oficial	Cenário BAU	PA	N	S

Legenda: ¹ Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact; ² Energy Technology Systems; ³ China Energy Group at Lawrence Berkeley National Laboratory

Fonte: Elaboração própria

Todas as ferramentas utilizam a abordagem *Bottom-up* ao estimar a linha de base, inventário ou cenários futuros, no entanto, apenas três ferramentas consideram a abordagem *Top-down* (MARKAL, MESSAGE e *National Energy Modeling System*) para calibrar os resultados da abordagem *Bottom-up*. As variáveis de entrada para cada abordagem foram as mesmas observadas nos estudos analisados no Capítulo 3.

Para calibrar os resultados de emissões de GEE e energia utilizando outra abordagem é importante para confirmar que a informação é consistente. Uma observação importante é que, apesar de o MARKAL ser o segundo modelo com maior quantidade de citações na pesquisa bibliográfica sistemática (com 11% de frequência) e permitir a calibração dos resultados por meio de uma abordagem *Top-down*, nenhum estudo identificado na pesquisa bibliográfica sistemática indicou seu uso.

Ademais, nenhum artigo com abordagem qualitativa foi considerado devido aos critérios estipulados para a atividade de seleção na Seção 4.1. A abordagem qualitativa é verificada em guias referenciais como o CCAP, *Transport Emissions Guidebook* e *Objectif CO₂*, não sendo comum em ferramentas de cálculos complexos como, por exemplo, um inventário de emissões. Conseqüentemente, todas as 21 ferramentas não apresentam dados de entrada ou ponderações prévias, em uma abordagem qualitativa, para modelar os dados.

Sendo assim, 38% das ferramentas são multissetoriais, podendo modelar energia ou emissões de diversos setores da economia (Por exemplo, indústria, geração de energia etc.). Dessa forma, é esperado que essas ferramentas, por tratar de diversos setores, considerem abordagens mais generalistas e agregadas. Ainda, 24% possuem o foco exclusivo em inventário de emissões de GEE e, portanto, não permitem a simulação de

múltiplos cenários de emissões de GEE; enquanto os 38% restantes possuem foco em análise estratégica de políticas de transporte (Por exemplo, NAMAs e NDC), dando ênfase em avaliar as mitigações oriundas de diversos cenários prospectivos.

Em relação ao tipo de avaliação das ferramentas, a Tabela 4.3 mostra os percentuais de cada tipo de avaliação.

Tabela 4.3: Tipo de avaliação contemplados nas ferramentas analisadas.

Tipo de avaliação	Citações	Frequência
<i>Ex-ante + ex-post + forecasting</i>	17	81,0%
<i>Ex-post + forecasting</i>	2	9,5%
<i>Ex-ante + backcasting</i>	1	4,8%
<i>Ex-ante + ex-post + forecasting + backcasting</i>	1	4,8%

Fonte: Elaboração própria

Diferente do identificado na pesquisa bibliográfica sistemática do Capítulo 3, a ferramenta FORfits modela o transporte dutoviário, embora não tenha sido apontado pela análise da SLoCaT. Dessa forma, esse contexto reforça a lacuna no conhecimento a respeito da modelagem de emissões e uso da energia desse modo de transporte. Ademais apenas seis ferramentas modelam todos os demais modos (FORfits, GCAN, LEAP, MOMO e SULTAN), incluindo o transporte ativo. Todas as ferramentas permitem modelar o modo rodoviário, porém 48% não consideram todos os tipos de veículos (automóveis, comerciais leves, motocicletas etc.) e operações (Por exemplo, transporte de passageiros por táxis³) e, em 80% destes casos, a ausência observada é na modelagem de motocicletas, que são representativas no Brasil.

³ Embora o táxi seja um automóvel, sua intensidade de uso e taxa de ocupação, usualmente, são superiores à de usuários convencionais.

O ciclo de vida de emissões é contemplado em 90% das ferramentas, que ou utilizam fatores de emissão que se referem não apenas à emissão de GEE final oriunda da queima de combustível fóssil e biocombustíveis, mais a emissão decorrente da geração de energia, ou permitem o cálculo mediante o fornecimento dos dados de entrada de emissões na fase de produção.

As ferramentas sintetizadas neste capítulo têm como principal variável de saída as emissões de GEE, porém algumas apresentam resultados adicionais, como as emissões de PA (em 67% das ferramentas) e a economia de energia obtida por cenário estimado (em 52% das ferramentas). Ainda, a maior parte (67%) das ferramentas são gratuitas, ou seja, de amplo acesso à academia, entidades públicas e privadas, além da sociedade civil.

Embora as 21 ferramentas englobem diversos elementos que estão no escopo desta tese, 43% das ferramentas são específicas para um país ou conjunto de países. Isso implica que possuem coeficientes padrão (*default*) desses países, sendo aplicados somente em contextos específicos. Essa característica restringe a aplicabilidade da ferramenta em todos os países.

4.3 Considerações finais do capítulo

Este capítulo buscou, com base em uma pesquisa documental, discretizar os principais métodos e/ou ferramentas utilizadas para modelar emissões com base na fonte de dados SLoCAT (2017) e atualizada a partir de uma pesquisa complementar. A SLoCAT possui a maior base de ferramentas, até o ano de 2020, para modelagem de inventários e prospecção de cenários identificada em pesquisa narrativa preliminar e, por isso, foi utilizada no levantamento dos dados.

Por conseguinte, concluiu-se que nenhuma ferramenta contempla todos os elementos propostos nesta tese, especificamente que:

1. Inclua abordagem qualitativa;
2. Considere as abordagens *Top-down* e *Bottom-up* na modelagem e calibração. Nesse caso, apenas três ferramentas permitem o cálculo considerando ambas as abordagens, porém, como identificado no Capítulo 3, isso foi utilizado em nenhum trabalho revisado;
3. Considere o transporte dutoviário. Apenas uma ferramenta contempla nativamente esse modo;
4. Permita realizar avaliações *ex-ante*, *ex-post*, *forecasting* e *backcasting*. Apenas um modelo permite realizar as quatro avaliações (VIBAT).

Diante disso, a atividade de síntese detalhada realizada neste Capítulo confirma a lacuna na literatura identificada na aplicação da pesquisa bibliográfica sistemática, ou seja, não foi identificado um método que: (1) estime a linha de base, bem como histórico; (2) especifique métodos para levantamento e seleção de dados e premissas; (3) considere todos os modos, incluindo o transporte ativo; (4) utilize abordagem *tier 3* para CH₄ e N₂O; e (5) calibre o modelo *Bottom-up* com a estimativa da atividade de transporte (ASIF) e demanda energética (*Top-down*) específica para o setor de transportes.

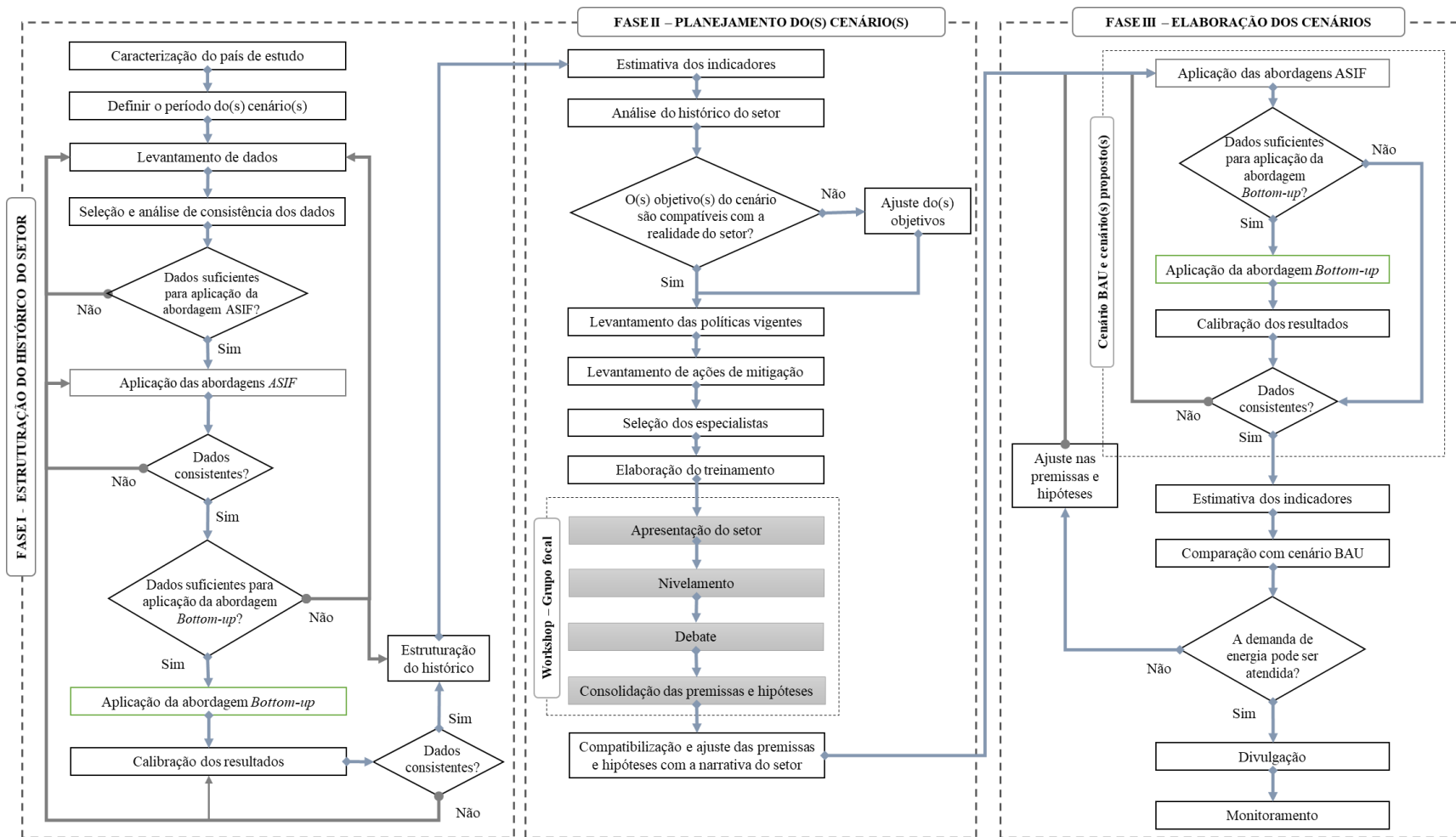
Portanto, as revisões realizadas fornecem subsídios para o desenvolvimento do método, que é descrito sistematicamente no próximo Capítulo.

5 MÉTODO PROPOSTO

Nesta seção, é apresentado o método proposto para elaborar cenários prospectivos de uso de energia e emissões de GEE, desenvolvido com base no conhecimento adquirido, por meio da pesquisa bibliográfica sistemática apresentada no Capítulos 3, da pesquisa documental do Capítulo 4 e utilização dos métodos e procedimentos adotados, apresentados no Capítulo 2. A partir disso, foi possível desenvolver o modelo de análise multinível de energia e emissões de transportes (*Transportation energy-emissions multi-tier analysis modeling* - TEMA).

De forma a atender o objetivo geral desta tese, propõe-se um método, seguindo uma abordagem multinível, para elaborar cenários prospectivos de uso de energia e emissões de GEE em transportes em nível nacional, contemplando desde a consolidação da série histórica, levantamento e seleção de premissas e hipóteses, debate com *stakeholders*, definição de indicadores e calibração das estimativas.

O TEMA é dividido em três fases: (i) estruturação do histórico do setor; (ii) planejamento do(s) cenário(s); e (iii) elaboração dos cenários. A Figura 5.1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra as três fases do TEMA e seus respectivos passos.



Fonte: Elaboração própria

Figura 5.1: TEMA.

5.1 Fase 1: Estruturação do histórico do setor

Esta fase engloba as seguintes etapas do método proposto: (i) caracterização do país de estudo; (ii) definição do período de análise do(s) cenário(s); (iii) levantamento de dados; (iv) análise e consistência dos dados; (v) aplicação das abordagens ASIF e *Top-down*; (vi) aplicação da abordagem *Bottom-up*; (vii) calibração dos resultados; e, (viii) estimativa das emissões de GEE.

Inicialmente, realiza-se a caracterização do país em estudo, por meio do levantamento de dados geográficos, populacionais, socioeconômicos, modos de transportes disponíveis, tecnologia, sistemas de propulsão e fontes de energia. Esta etapa deve ser complementada com o levantamento das principais instituições responsáveis por: estatísticas macroeconômicas, demanda de energia, qualidade do ar, estatísticas do setor de transportes e regulação de fontes de energia. Além disso, é necessário levantar as instituições-chave para cada modo e atividade de transporte.

Após a etapa de caracterização, com o levantamento das principais instituições, estabelece-se o horizonte de análise do(s) cenário(s). Ressalta-se que quanto maior for o período a ser estimado, maior deve ser a série histórica de forma a aumentar a confiabilidade da estimativa.

A Tabela 5.1 resume os dados anuais necessários para aplicação de todas as abordagens consideradas no método do TEMA, variando conforme a disponibilidade local. Os requisitos de dados de entrada foram identificados, validados e inseridos no TEMA a partir das revisões conduzidas nos Capítulos 3 e 4 e discussões com *stakeholders* (Apêndice I), bem como da experiência do autor.

Tabela 5.1: Dados anuais necessários para aplicação do método proposto

	Dados necessários	Unidade	
Dados macroeconômicos	População	Habitantes	
	PIB	R\$	
Demanda energética anual	Por tipo, modo e atividade	tep, joule, Wh ou unidade comercial	
Características dos combustíveis e biocombustíveis	Fator de conversão	unidade comercial para tep ou joule	
	Densidade	t/m ³	
	Composição	% da mistura (p. ex. % de etanol anidro na gasolina)	
	Poder calorífico	kcal/kg	
Energia elétrica	Fator de conversão	unidade comercial para tep ou joule	
Divisão modal por tipo de atividade	Carga	%/modo	
	Passageiro		
Inventário de emissões	Contemplando todos os setores econômicos	CO ₂ ou CO ₂ e/setor	
	Inventário por modo de transporte e atividade	CO ₂ ou CO ₂ e/modo e atividade	
	Fatores de emissão	g/km ou g/unidade comercial ou tep ou joule por GEE	
Transporte de carga	Aéreo	Momento de transporte	t-km
		Carga movimentada	t
		Quilometragem média por viagem	km/viagem
		Demanda energética	unidade comercial ou tep ou joule
		Intensidade energética ou coeficiente de consumo	kJ/t-km ou l/km
	Aquático	Momento de transporte total (cabotagem + navegação interior)	t-km
		Momento de transporte - cabotagem	t-km
		Carga movimentada - cabotagem	t
		Quilometragem média por viagem - cabotagem	km/viagem
		Intensidade energética ou coeficiente de consumo	kJ/t-km ou l/km
		Momento de transporte - Navegação interior	t-km
		Carga movimentada - Navegação interior	t
		Quilometragem média por viagem - Navegação interior	km/viagem
		Demanda energética	unidade comercial ou tep ou joule
		Intensidade energética ou coeficiente de consumo	kJ/t-km ou l/km
	Dutoviário	Momento de transporte total	t-km
		Intensidade energética	kJ/t-km
		Momento de transporte - mineroduto	t-km
		Carga movimentada - mineroduto	t
		Quilometragem média por viagem - mineroduto	km/viagem
Intensidade energética ou coeficiente de consumo -mineroduto		kJ/t-km ou l/km ou kWh/km	
Momento de transporte - gasoduto		t-km	
Carga movimentada - gasoduto	t		

		Dados necessários	Unidade
		Quilometragem média por viagem - gasoduto	km/viagem
		Intensidade energética ou coeficiente de consumo - gasoduto	kJ/t-km ou l/km ou kWh/km
		Momento de transporte - oleoduto	t-km
		Carga movimentada - oleoduto	t
		Quilometragem média por viagem - oleoduto	km/viagem
		Demanda energética	unidade comercial ou tep ou joule
	Ferroviário	Intensidade energética ou coeficiente de consumo - oleoduto	kJ/t-km ou l/km ou kWh/km
		Momento de transporte total	t-km
		Intensidade energética	kJ/t-km
		Momento de transporte por ferrovia	t-km
		Demanda energética	unidade comercial ou tep ou joule
		Intensidade energética ou coeficiente de consumo por ferrovia	kJ/t-km ou l/km ou kWh/km
		Carga movimentada por ferrovia	t
		Quilometragem média por viagem	km/viagem
Rodoviário	Momento de transporte total	t-km	
	Intensidade energética	kJ/t-km	
	Vendas/licenciamento por tipo de veículo ⁴ , tecnologia ⁵ e ano de fabricação	n° de veículos	
	Estimativa da frota circulante por tipo de veículo, tecnologia e ano de fabricação	n° de veículos	
	Coeficiente de consumo por tipo de veículo, tecnologia e ano de fabricação	l/km	
	Intensidade de uso por tipo de veículo, tecnologia e ano de fabricação	km/ano	
	Ocupação média por tipo de veículo, tecnologia e ano de fabricação	t/veículo	
	Demanda energética	unidade comercial ou tep ou joule	
	Carga total movimentada	t	
	Quilometragem média por viagem	km/viagem	
Transporte de passageiros	Aéreo	Momento de transporte	pass-km
		Carga movimentada	t
		Quilometragem média por viagem	km/viagem
		Demanda energética	unidade comercial ou tep ou joule
		Intensidade energética ou coeficiente de consumo	kJ/pass-km ou l/km
	Aquático	Momento de transporte total (transporte urbano + navegação interior)	pass-km
		Intensidade energética média (transporte urbano + navegação interior)	kJ/pass-km
		Momento de transporte – urbano	pass-km
		Passageiros transportados – urbano	n° de passageiros

⁴ Comerciais leves, Caminhão (semileve, leve, médio, semipesado e pesado) e motocicletas.

⁵ Ciclo Diesel (dedicado a diesel e dedicado a etanol), Ciclo Otto (Dedicado a gasolina, dedicado a etanol e *flexible-fuel*) elétrico a bateria, híbrido elétrico (em série e em paralelo), convertido a GNV, célula combustível etc.

	Dados necessários	Unidade
	Quilometragem média por viagem - urbano	km/viagem
	Intensidade energética ou coeficiente de consumo	kJ/pass-km ou l/km
	Momento de transporte - Navegação interior	pass-km
	Passageiros transportados - Navegação interior	n° de passageiros
	Quilometragem média por viagem - Navegação interior	km/viagem
	Demanda energética	unidade comercial ou tep ou joule
	Intensidade energética ou coeficiente de consumo	kJ/pass-km ou l/km
	Momento de transporte total	pass-km
	Intensidade energética	kJ/pass-km
	Demanda energética	unidade comercial ou tep ou joule
	Momento de transporte – metrô	pass-km
	Passageiros transportados – metrô	Passageiros
	Quilometragem média por viagem - metrô	km/viagem
	Intensidade energética ou coeficiente de consumo -metrô	kJ/pass-km ou kWh/km
	Momento de transporte - trens urbanos	pass-km
	Demanda energética	unidade comercial ou tep ou joule
	Passageiros transportados - trens urbanos	Passageiros
Ferroviário	Quilometragem média por viagem - trens urbanos	km/viagem
	Intensidade energética ou coeficiente de consumo - trens urbanos	kJ/pass-km ou kWh/km
	Momento de transporte – Monotrilho	pass-km
	Passageiros transportados – Monotrilho	Passageiros
	Quilometragem média por viagem - Monotrilho	km/viagem
	Intensidade energética ou coeficiente de consumo -Monotrilho	kJ/pass-km ou kWh/km
	Momento de transporte – VLT	pass-km
	Passageiros transportados – VLT	Passageiros
	Quilometragem média por viagem - VLT	km/viagem
	Intensidade energética ou coeficiente de consumo -VLT	kJ/pass-km ou kWh/km
	Momento de transporte total	pass-km
	Intensidade energética	kJ/pass-km
Rodoviário	Demanda energética	unidade comercial ou tep ou joule
	Vendas/licenciamento por tipo de veículo ⁶ , tecnologia ⁷ e ano de fabricação	n° de veículos

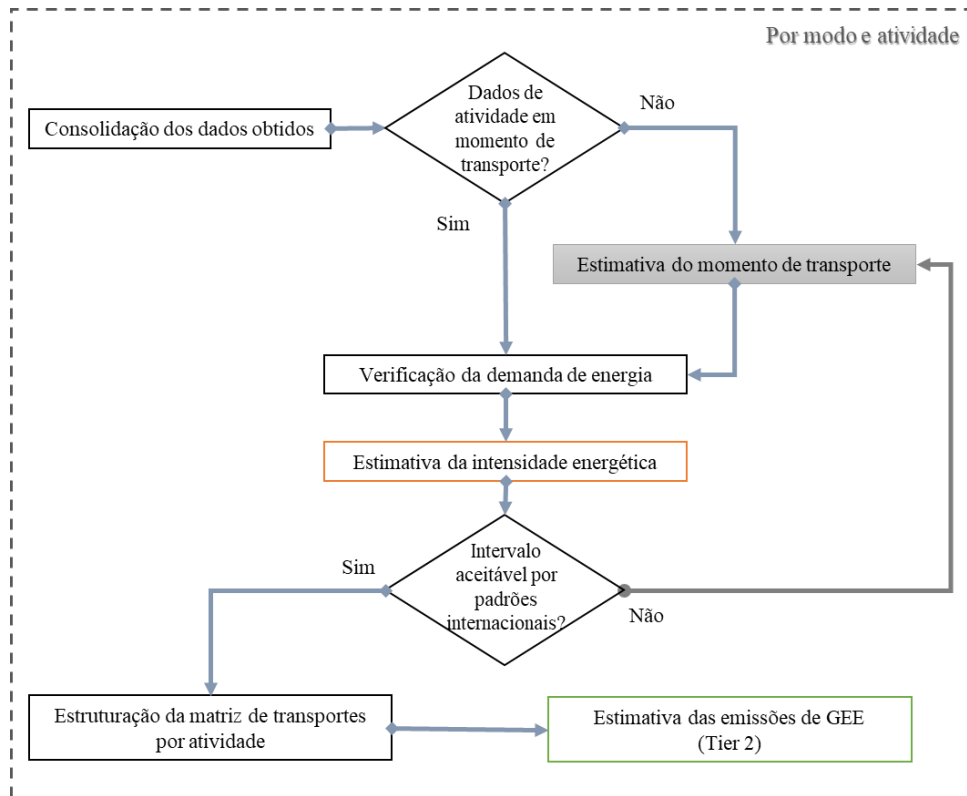
⁶ Automóvel (com motor menor ou igual a 1.0; motor entre 1.1 e 1.9, inclusive; e motor igual ou superior a 2.0), comercial leve (motor entre 1.4 e 1.9; motor igual ou superior a 2.0), motocicleta (menor ou igual a 150 cilindradas, e maiores que 150) e ônibus (micro, urbano básico, urbano *padron* e rodoviário).

⁷ Ciclo Otto (dedicado à gasolina, dedicado a etanol, *flexible-fuel* e convertidos a gás natural veicular); Ciclo Diesel (dedicado a diesel e dedicado a etanol), elétrico a bateria, híbrido elétrico (em série e em paralelo), convertido a GNV, célula combustível etc.

Dados necessários	Unidade
Estimativa da frota circulante por tipo de veículo, tecnologia e ano de fabricação	n° de veículos
Coefficiente de consumo por tipo de veículo, tecnologia e ano de fabricação	l/km
Intensidade de uso por tipo de veículo, tecnologia e ano de fabricação	km/ano
Ocupação média por tipo de veículo, tecnologia e ano de fabricação	p/veículo
Passageiros total transportado - transporte público	Pax
Quilometragem média por viagem - transporte público	km/viagem

Fonte: Elaboração própria

A etapa de coleta de dados, então, é sucedida pela análise de consistência, verificando a evolução histórica das informações obtidas, *outliers* e outros elementos que podem indicar não conformidades. Trata-se de uma análise preliminar, verificando se os dados coletados são condizentes com valores esperados (por exemplo, em países semelhantes), bem como com a conjuntura jurídica/regulatória e comportamental da sociedade do país no período analisado. Por exemplo, a introdução de novas tecnologias ou serviços disruptivos pode explicar pontos de inflexão em evoluções históricas de dados coletados. Caso haja divergências, deve-se realizar novo levantamento de dados, visando reduzir incertezas. Assim, caso os dados sejam consistentes, deve ser adotada a abordagem ASIF (Figura 5.2).



Fonte: Elaboração própria

Figura 5.2: Abordagem ASIF

Inicialmente, para os modos de transporte que não seja possível obter o momento de transporte, deve-se estimá-lo por meio da Equação 1.

$$AS_{m,l,a}^{estimado} = \sum_a P_a \cdot qu_a \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

$AS_{m,a}$: é o momento de transporte por modo (m) para o ano (a) em pass-km (para passageiros) e t-km (para carga);

P_a : é o total de passageiros transportados (para o transporte de passageiros) ou o total de carga movimentada (para o transporte de carga) modo (m) para o ano (i), em pass (para passageiros) e t (para carga);

qu_a : é a extensão média por viagem, em km.

Em seguida, compara-se a evolução tendencial dos *outputs* de consumo energético e momento de transporte entre si e em relação a parâmetros como população e PIB. Segundo Gonçalves e D'Agosto (2017), historicamente o momento de transporte de passageiros apresenta uma forte correlação com PIB *per capita* (relação entre PIB e população), considerando que os deslocamentos de passageiros não estejam relacionados apenas à quantidade de pessoas, mas também ao seu poder aquisitivo. Por sua vez, o transporte de carga apresenta forte correlação histórica com o PIB (GONÇALVES e D'AGOSTO, 2017).

Confrontando ambas as variáveis, é possível estimar a intensidade energética (Equação 2).

$$IE_{ma} = \frac{Ce_{ma}}{Mt_{ma}} \quad \text{Equação 2}$$

Em que,

IE_{ma} é a intensidade energética para o modo de transporte (m) e o ano (a);

Ce_{ma} é o consumo de energia em Joule para o modo de transporte (m) e o ano (a);

Mt_{ma} é o momento de transporte por modo e ano.

Semelhantemente às atividades anteriores, deve-se analisar a evolução da intensidade energética por modo e tipo de atividade no período, verificando também se os valores obtidos estão dentro de limites esperados, nacionais e internacionais, identificados na literatura. Caso não haja conformidade, deve-se estimar novamente o momento de transporte, revisando os dados de entrada do modelo. Na outra vertente, caso o valor esteja no intervalo identificado na literatura, deve-se estruturar o histórico do momento de transporte, intensidade energética e energia por modo e atividade⁸.

⁸ Caso a divergência seja pontual, ou seja, os resultados são coerentes com os padrões internacionais, mas alguns anos divergem, sugere-se interpolar/extrapolar a intensidade energética como forma de calcular o momento de transporte. Caso os dados disponíveis de um modo específico estejam defasados em relação ao demais, sugere-se a consideração da participação histórica do modo na matriz de transportes ou considerar a mesma intensidade energética do último ano disponível.

Com base no histórico estruturado de energia, estima-se as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O (gases convencionalmente estimados) por meio do *tier 2*, e posteriormente, calcula-se o CO₂e por meio do GWP ou GTP determinado pela Convenção do Clima. Em países onde há misturas regulamentadas de biocombustíveis em combustíveis fósseis e/ou a presença de veículos do tipo *flexible fuel* (como no Brasil), recomenda-se a ponderação da intensidade de carbono, considerando os fatores de emissão dos combustíveis e a sua participação no consumo do modo de transporte no ano analisado.

$$ASIF_{m,t,a} = \sum_i AS_{m,t,a} \cdot I_{m,t,a} \cdot F_{i,t,a} \quad \text{Equação 3}$$

Em que,

ASIF: é a emissão de GEE do modo (*m*), tipo de atividade (*t*) e ano (*a*)

AS_{m,t,a}: é o momento de transporte do modo (*m*), tipo de atividade (*t*) e ano (*a*)

I_{m,t,a}: é a intensidade energética do modo (*m*), tipo de atividade (*t*) e ano (*a*)

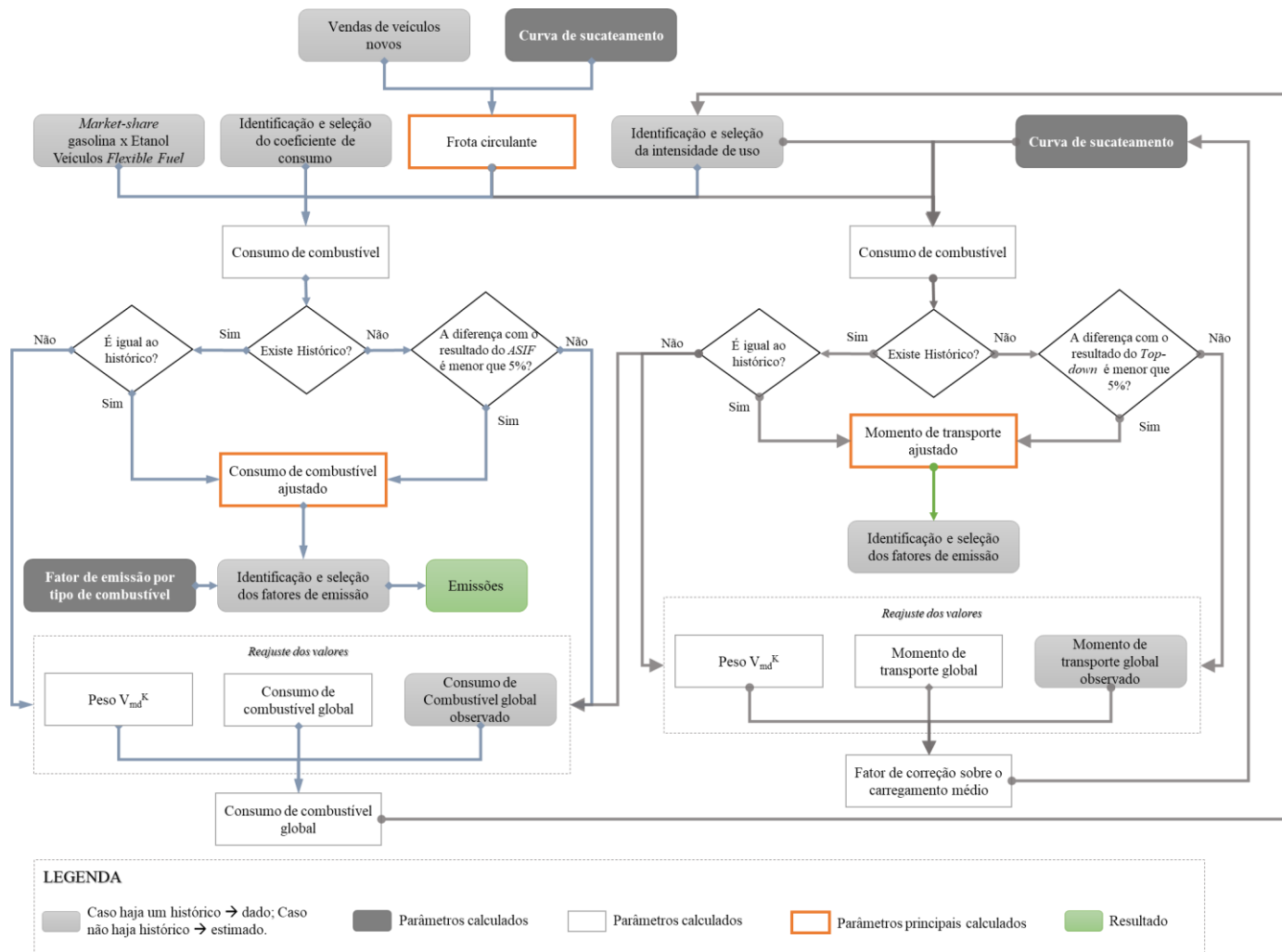
F_{m,t,a}: é a intensidade de carbono da energia (*i*), tipo de atividade (*t*) e ano (*a*).

Ressalta-se que fora realizada uma adaptação à estrutura originalmente proposta por Schipper *et al.* (2000), que separava o momento de transporte total (A) do país da participação modal (S). Em decorrência da, convencionalmente, escassa informação sobre o momento de transporte total de um país, bem como da existência preliminar de divisões modais anuais consistentes, propõe-se que considere o cálculo das emissões com base no momento de transporte de cada modo (ou seja, conforme a Equação 1).

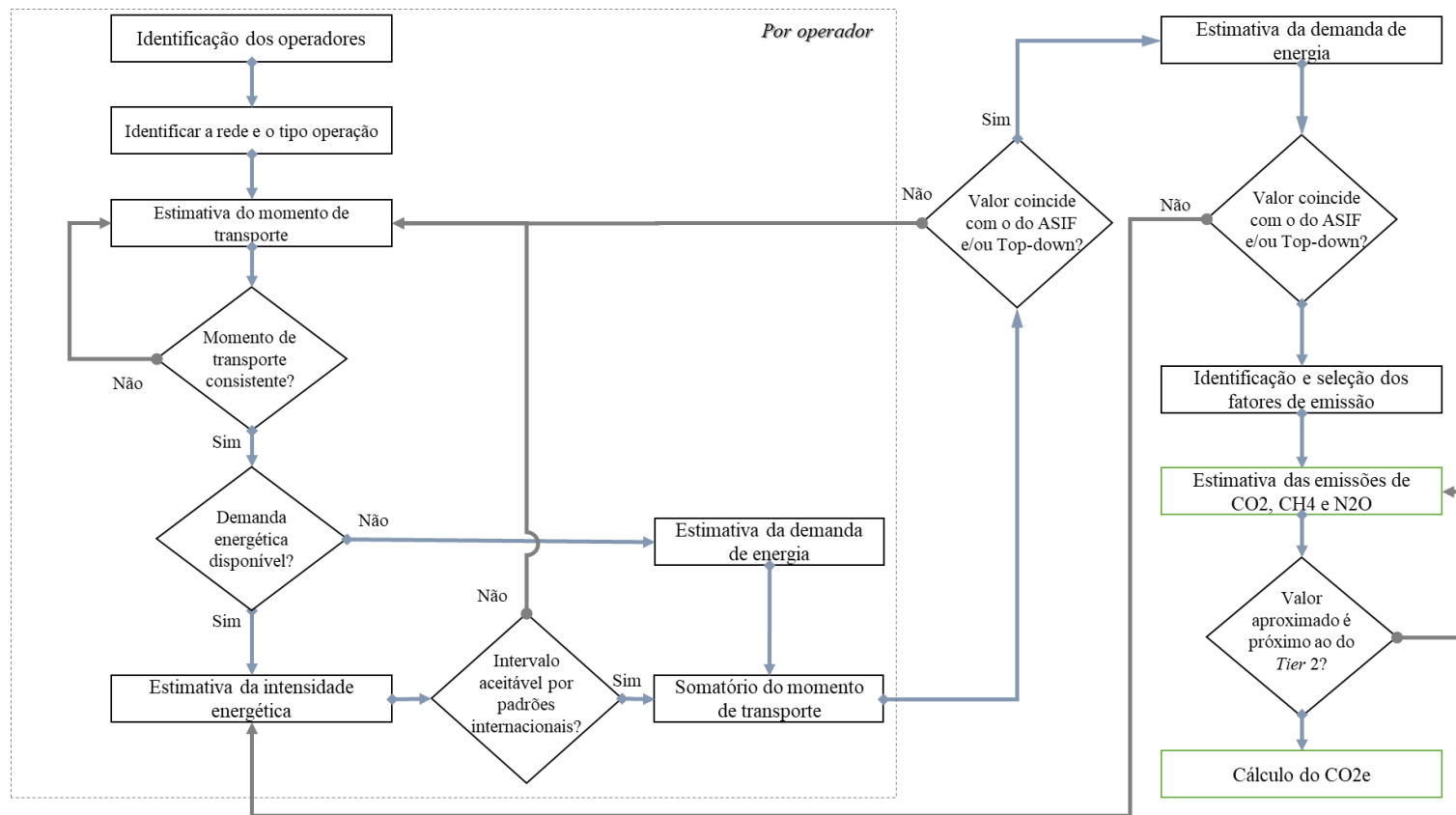
Concomitantemente, como forma de validação dos resultados, deve-se estimar as emissões de CO₂ por meio da abordagem *Top-down*. Essa abordagem se baseia na multiplicação da demanda total de energia dos balanços energético disponíveis e seu respectivo fator de emissão default do IPCC (*tier 1*).

Isto posto, a próxima atividade consiste na aplicação da abordagem *Bottom-up*. Ressalta-se que, a depender da variedade de dados disponíveis, as etapas metodológicas da abordagem *Bottom-up* são diferentes, por exemplo, a Figura 5.3 apresenta uma abordagem detalhada, na existência de dados desagregados disponíveis no país. Por sua vez, a Figura 5.4 mostra as etapas utilizadas para casos com restrição de dados, seja por ausência ou por alta inconsistência.

A literatura aponta que, na ausência de dados para aplicar a abordagem apresentada na Figura 5.3, deve-se considerar a aplicação de uma abordagem ASIF e/ou *Top-down*. No entanto, neste trabalho, desenvolveu-se uma abordagem com dados mais agregados que a abordagem *Bottom-up* convencional, todavia, mais desagregada que as abordagens *Top-down* e ASIF, podendo ser aplicada sobretudo nos modos aéreo, aquático, dutoviário e ferroviário. Essa particularidade decorre das características operacionais desses modos, mais restritas em termos de capacidade, investimentos previstos e outras variáveis específicas, dissonando do dinamismo do modo rodoviário.



Fonte: Elaboração própria
 Figura 5.3: Abordagem *Bottom-up*.



Fonte: Elaboração própria

Figura 5.4: Abordagem *Bottom-up* alternativa para os modos aéreo, aquático, dutoviário e ferroviário.

Para aplicação da abordagem apresentada na Figura 5.3, o primeiro passo é o cálculo da frota circulante (Equação 4), por meio dos veículos vendidos (entrada) e curvas de sucateamento ou taxa de sobrevivência (saída) para os diferentes tipos de veículos e tecnologia.

$$Fr_{a,V_{md},k} = V_{mda} \times (1 - S_{a,V_{md},k}) \quad \text{Equação 4}$$

Em que,

$Fr_{a,V_{md},k}$: frota circulante estimada, expressa em números de veículos, para o ano (a) referente ao veículo (V_{md}) e energia (k);

V_{md}, k : veículos do tipo (V) e ano modelo (md) e energia (k);

$S_{a,V_{md},k}$: fração de veículos V_{md} (ano-modelo), já sucateados e que, portanto, não circulam no ano (a).

Em seguida, é necessária a estimativa da demanda energética (Equação 5), a partir do coeficiente de consumo (l/km), que deve ser identificado em estudos nacionais e/ou em programas de etiquetagem veicular. Caso a demanda de energia calculada por meio da intensidade de uso não esteja de acordo com o observado por meio do histórico ou o estimado por meio da abordagem ASIF, a intensidade de uso deverá ser ajustada.

$$C_{i,estimado} = Fr_i \cdot \frac{Iu_{i,referência}}{Ql_i} \quad \text{Equação 5}$$

Em que,

$C_{i, estimado}$: consumo anual de energia do veículo do tipo i (l/ano);

$Fr_{i, estimado}$: frota em circulação no ano do veículo do tipo i (número de veículos);

$Iu_{i, referência}$: intensidade de uso de referência do veículo do tipo i , expressa em quilometragem anual percorrida (km/ano);

Ql_i : quilometragem por litro de combustível do veículo do tipo i (km/l).

Nesse caso, com base no somatório dos valores de $C_{i, estimado}$ para cada categoria de veículo e ano-modelo, pode-se estimar o consumo agregado por tipo de combustível com base na Equação 6.

$$C_{estimado} = \sum C_{i, estimado} \quad \text{Equação 6}$$

Em que,

$C_{estimado}$: consumo anual total de um tipo de combustível (de todas as categorias de veículos), estimado a partir dos valores de intensidade de uso de referência (l/ano);

O ajuste da intensidade energética estimada (*Bottom-up*) e observada (*ASIF*) é realizado por meio da Equação 7.

$$Iu_{i, ajustada} = Iu_{i, referencia} \cdot \frac{C_{observado}}{C_{estimado}} \quad \text{Equação 7}$$

Em que,

$Iu_{i, ajustada}$: intensidade de uso anual ajustada do veículo do tipo i , expressa em termos de quilometragem anual percorrida (km/ano);

$C_{observado}$: consumo anual agregado de um tipo de combustível (l/ano).

Assim, o ajuste do consumo por tipo de veículo (i) é ajustado mediante a nova intensidade ($Iu_{i, ajustada}$) por meio da Equação 8.

$$C_{i, ajustado} = Fr_i \cdot \frac{Iu_{i, ajustado}}{Ql_i} \quad \text{Equação 8}$$

Em que,

$C_{i, ajustado}$: consumo anual de combustível do veículo do tipo i , calculado a partir do seu valor de intensidade de uso de referência (L/ano).

A partir da intensidade de uso definida e ajustada, determina-se o momento de transporte para o transporte de carga (t-km) e passageiro (pass-km), por meio da Equação 9 e Equação 10, respectivamente.

$$M_{\text{calculado}}^{a,carga} = \sum_{cam_{tp}} Fr_{a,cam_{tp},k} \cdot Iu'_{a,cam_{tp},k} \cdot Carreg_{a,cam_{tp}}^{\text{m\u00e9dio}} \quad \text{Equa\u00e7\u00e3o 9}$$

$$M_{\text{calculado}}^{a,passageiro} = \sum_{Vp_l} Fr_{a,Vp_l,k} \cdot Iu'_{a,Vp_l,k} \cdot Carreg_{a,Vp_l}^{\text{m\u00e9dio}} \quad \text{Equa\u00e7\u00e3o 10}$$

Em que,

cam_{tp} : ve\u00edculos do transporte de carga por tipo;

Vp_l : ve\u00edculos do transporte de passageiros por tipo.

Para que o momento de transporte calculado seja igual ao estimado, com base na aplica\u00e7\u00e3o da abordagem ASIF, s\u00e3o determinados os coeficientes $\beta_{carga,a}$ e $\beta_{passageiro,a}$. Tais coeficientes s\u00e3o definidos por meio dos protocolos expostos na Equa\u00e7\u00e3o 11 e na Equa\u00e7\u00e3o 12, que s\u00e3o utilizados para ajustar o carregamento m\u00e9dio.

Para o caso de o momento de transporte de carga calculado para um determinado modo de transporte ser maior que o observado, a corre\u00e7\u00e3o \u00e9 feita ao ajustar a taxa de lota\u00e7\u00e3o/ocupa\u00e7\u00e3o dos ve\u00edculos, de prefer\u00eancia dos de menor capacidade para os de maior capacidade, de modo que o momento calculado seja igual ao observado. Ainda, no caso de o valor calculado ser menor do que o momento de transporte observado ou estimado, a corre\u00e7\u00e3o pode ser realizada ao ajustar a taxa de lota\u00e7\u00e3o dos ve\u00edculos de maior capacidade para os de menor capacidade, de modo que o momento calculado seja igual ao observado.

Ademais, no caso de o momento de transporte de passageiros calculado ser maior do que o observado, a correção é realizada ao se ajustar a taxa de ocupação dos veículos de maior capacidade para os de menor capacidade, de modo que o momento calculado seja igual ao observado ou estimado. No caso de a estimativa ser menor do que o momento de transporte observado ou estimado, a correção é realizada ao se ajustar a taxa de ocupação dos veículos, considerando a evolução histórica, de modo que o momento calculado seja igual ao observado ou estimado. Para ambos os casos (carga e passageiros), além do ajuste na lotação média, pode ser necessário o ajuste na intensidade de uso, considerando a calibração do consumo.

$$\beta_{carga,a} = \frac{Momento_{a,carga}^{observado}}{Momento_{a,carga}^{calculado}} \quad \text{Equação 11}$$

$$\beta_{passageiros,a} = \frac{Momento_{a,passageiro}^{observado}}{Momento_{a,passageiro}^{calculado}} \quad \text{Equação 12}$$

É importante destacar que as Equações Equação 7, Equação 11 e Equação 12 oferecem um parâmetro inicial, que deve ser avaliado pelo especialista, a partir de um conhecimento pericial do setor e no comportamento histórico das variáveis de ajuste para cada categoria de veículo e tecnologia, dado que os resultados serão validados por *stakeholders*. De posse do momento de transporte e da demanda energética calibrados, para o cálculo das emissões de CO₂, multiplica-se o consumo de cada combustível de cada veículo pelo fator de emissão de cada ano, conforme Equação 13.

$$E_{vCO_2}^a = \sum_k Vol_{a,k,v} * Fe_{a,k,v} \quad \text{Equação 13}$$

Em que,

$E_{vCO_2}^a$: é a emissão anual (a) em kg para o veículo (v) de CO₂;

$Vol_{A,k,v}$: é o volume anual (a) do combustível (k) calculado para veículo (v); e

$Fe_{a,k,v}$: é o fator de emissão do CO₂ para o ano a, expresso em kg/l, variando de acordo com o combustível (k) e veículo (v).

Para o cálculo das emissões de CH₄ e N₂O, utiliza-se a Equação 14, em que se multiplica a quilometragem média percorrida de cada veículo e tipo de combustível pelo seu respectivo fator de emissão.

$$E_{v,a,k,g} = \sum (\overline{Km}_{v,a,k} * Fe_{gva,k}) \quad \text{Equação 14}$$

Em que,

$E_{v,a,k,g}$ é a emissão anual, expresso em g, para o veículo (v), ano de fabricação (a) e combustível (k), do GEE (g);

$\overline{Km}_{v,a,k}$: é a quilometragem média anual percorrida pelo veículo (v), do ano de fabricação (a) e combustível (k);

$Fe_{v,a,k}$: é o fator de emissão do GEE (g), expresso em g/km, variando de acordo veículo (v), ano de fabricação (a) e combustível (k).

Entende-se que nem todos os países possuem a mesmo nível de detalhamento necessário para aplicar a abordagem da Figura 5.3, dessa forma, recomenda-se a abordagem *Bottom-up* exposta na Figura 5.4 como forma de estimar a atividade, energia e emissões para os modos aéreo, aquático, dutoviário e ferroviário. Apesar de essa abordagem utilizar dados dos operadores de cada modo e, portanto, desconsiderar a renovação da frota, coeficiente de consumo dos veículos, idade média etc., não é considerada uma abordagem *Top-down*, além de se diferir de uma abordagem ASIF convencional, dado que o fluxo lógico de atividades não parte da estimativa nacional para cada modo e atividade, mas dos valores

dos operadores, considerando tipo de operação, extensão da malha, características operacionais (por exemplo, *commodities* agrícolas, minério e produtos acabados), intensidade energética, tipo de energia demandada e extensão média das viagens. Com isso, deve-se identificar os operadores de transporte, a rede, características operacionais, tipo de energia demanda anual de passageiros ou carga e extensão média das viagens para calcular o momento de transporte (Equação 1).

A análise de consistência dos dados de momento de transporte é similar àquela exposta na abordagem ASIF, no entanto, verifica se a participação do operador na atividade do modo condiz com o cenário identificado na caracterização da operação (ou seja, a participação relativa do operador no total transportado). Caso não seja consistente, deve-se recalculá-lo o momento de transporte. Em seguida, levanta-se o dado de consumo energético do operador para que seja estimada a intensidade energética do operador, verificando se ela está no intervalo identificado na literatura. Se não houver dados disponíveis sobre consumo energético, recomenda-se a adoção da intensidade energética obtida na abordagem ASIF.

De posse do momento de transporte e da intensidade energética para todos os operadores do modo analisado, deve-se verificar se o valor se aproxima daquele estimado pela abordagem ASIF. Caso não se aproxime, deve-se verificar os dados dos operadores e as etapas metodológicas da abordagem ASIF, ajustando os dados inconsistentes. Caso os valores sejam aproximados, busca-se identificar os fatores de emissão com base no nível de detalhamento disponível (*tier*) para calcular as emissões de GEE. Posteriormente, compara-se os dados com os obtidos por meio das abordagens ASIF (*tier 2*) e *Top-down* (*tier 1*) e, se o valor for aproximado, calcula-se o CO₂e.

Para a aferição das emissões do CO₂e, é importante salientar que, para obrigações internacionais, a Convenção do Clima é que decide em suas reuniões anuais qual relatório do IPCC usar, em outras palavras, qual fator de concentração GWP aplicar. Depois de determinar inicialmente o uso do GWP-SAR (*Second Assessment Report*), apenas recentemente o uso do GWP-AR4 (*Fourth Assessment Report*) foi apontado como obrigação nos inventários dos países industrializados.

Desta forma, com os resultados de ambas as abordagens é possível realizar a atividade de calibração, ratificando as saídas da abordagem *Bottom-up*. Caso haja divergência significativa, deve-se verificar qual abordagem deve ser revista (com base na experiência do especialista). Na outra vertente, é possível obter o histórico de atividade (momento), energia e emissões do setor de transportes.

5.2 Fase 2: Planejamento do(s) cenário(s)

Esta fase busca realizar o planejamento do(s) cenário(s), como estimar indicadores, levantar políticas vigentes e discutir com especialistas premissas e hipóteses que servem de base para a projeção da energia, atividade e emissões para o período definido para análise (cenário). Para isso, aconselha-se a participação ativa dos especialistas envolvidos no desenvolvimento dos cenários em *workshops*, grupos de trabalho e/ou programas do setor.

Dessa forma, o primeiro passo é a definição do objetivo de cada cenário, como por exemplo, identificar o impacto das atuais políticas; verificar como atender os compromissos internacionais (por exemplo, NAMAs e NDC); e testar medidas de mitigação. Além disso, recomenda-se estimar o cenário tendencial (BAU - *business as usual*) do setor para fins de comparação.

Inicialmente, define-se e estima-se os indicadores que servirão de base comparativa para os períodos futuros. Nesse sentido, sugere-se a utilização de indicadores que balizem o comportamento do setor, uma vez que se pode convertê-los em dados secundários, assim como podem ser utilizados como elementos de comparação entre diversos países e setores de um mesmo país. Dessa forma, recomenda-se ao menos os seguintes indicadores apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Proposta de indicadores

Indicador	Unidade
Divisão modal – transporte de passageiros	%/modo
Divisão modal – transporte de carga	%/modo
Intensidade de carbono	Mt CO ₂ e/t-km e Mt CO ₂ e/pass-km
Intensidade energética	kJ/t-km e kJ/pass-km
Participação de biocombustíveis na matriz energética do setor	%
Participação de eletricidade na matriz energética do setor	%
Misturas regulamentadas vigentes de biocombustíveis nos combustíveis (por exemplo. Biodiesel no diesel)	%
Participação de veículos alternativos (elétricos e híbridos) no <i>market share</i> de licenciamento e na frota circulante	%

Fonte: Elaboração própria

Com base na análise dos indicadores e do histórico do setor, verifica-se se o(s) objetivo(s) do(s) cenário(s) são aderentes à realidade e à disponibilidade de dados do setor, por exemplo, se uma meta de mitigação efetivamente tem como ser atingida no período determinado (pois está longe do possível com a infraestrutura atual) ou se ela já foi atingida, caso fosse baseada em um histórico defasado. Em caso de divergência, deve-se ajustar o objetivo do cenário com base na nova estimativa do *baseline*.

Em seguida, deve-se avaliar estimativas globais de relatório de referência (Por exemplo, IEA, EPA etc.) e realizar o levantamento das políticas e investimentos em infraestrutura dos planos governamentais locais vigentes para serem inseridos no cenário. Esses planos

são independentes de ações de mitigação que um governo se proponha a atender. Assim, os impactos das obras de infraestrutura podem ser incorporados em alterações futuras no momento de transporte, eficiência energética ou emissões. Ademais, inserem-se programas vigentes e ações de mitigação oriundas do comprometimento governamental, por exemplo, o melhoramento da eficiência energética ao longo do período ou investimento em um modo com maior capacidade de transporte.

Após o levantamento das políticas vigentes, devem ser estabelecidas, por meio de uma revisão documental, premissas e hipóteses que nortearão a evolução do setor ao longo do tempo, por exemplo, definindo o nível de profundidade dos impactos das ações de mitigação em termos de percentual de melhoramento da eficiência energética ou impacto na atividade de transporte e em quais anos os efeitos dessas medidas são verificados. Essa atividade demanda a participação de diversos atores envolvidos no processo (sociedade civil, poder público, iniciativa privada e academia), que deve ser organizada com base em um procedimento estruturado, por exemplo, reuniões, entrevistas e *workshops*.

Neste trabalho, recomenda-se a realização de *workshops*, visto haver a necessidade de nivelar o grupo participante com a temática, explicando os desafios e mostrando como uma ação de mitigação impacta outras ações e o setor de transportes (atividade, consumo energético e emissões).

Sugere-se a condução de um grupo focal como método para discutir premissas e a narrativa do setor. A essência desse método consiste na interação entre os participantes e o pesquisador, com o objetivo de coletar dados a partir da discussão focada em tópicos específicos e diretivos (PELICIONI, 2001). Quanto ao número de especialistas consultados, Trad (2009) recomenda entre seis e quinze participantes em grupos focais. Deve-se convidar participantes com um conhecimento e experiência nos temas

abordados, levando-se em consideração mais o conhecimento tácito do especialista no assunto, do que títulos ou postos hierárquicos assumidos por eles (PIO, 2002).

Nessa linha, devem ser convidados participantes da iniciativa privada e representantes do governo que atuem no setor de transporte ou afins (por exemplo, meio ambiente, energia, desenvolvimento regional etc.), instituições do terceiro setor, representantes da sociedade civil e especialistas da academia. Dessa forma, busca-se estruturar um grupo multidisciplinar com pelo menos um representante de cada um dos seguintes seguimentos: mobilidade ativa, infraestrutura de transportes, biocombustíveis/combustíveis, planejamento energético, planejamento de transportes, mobilidade elétrica, logística e setor automotivo.

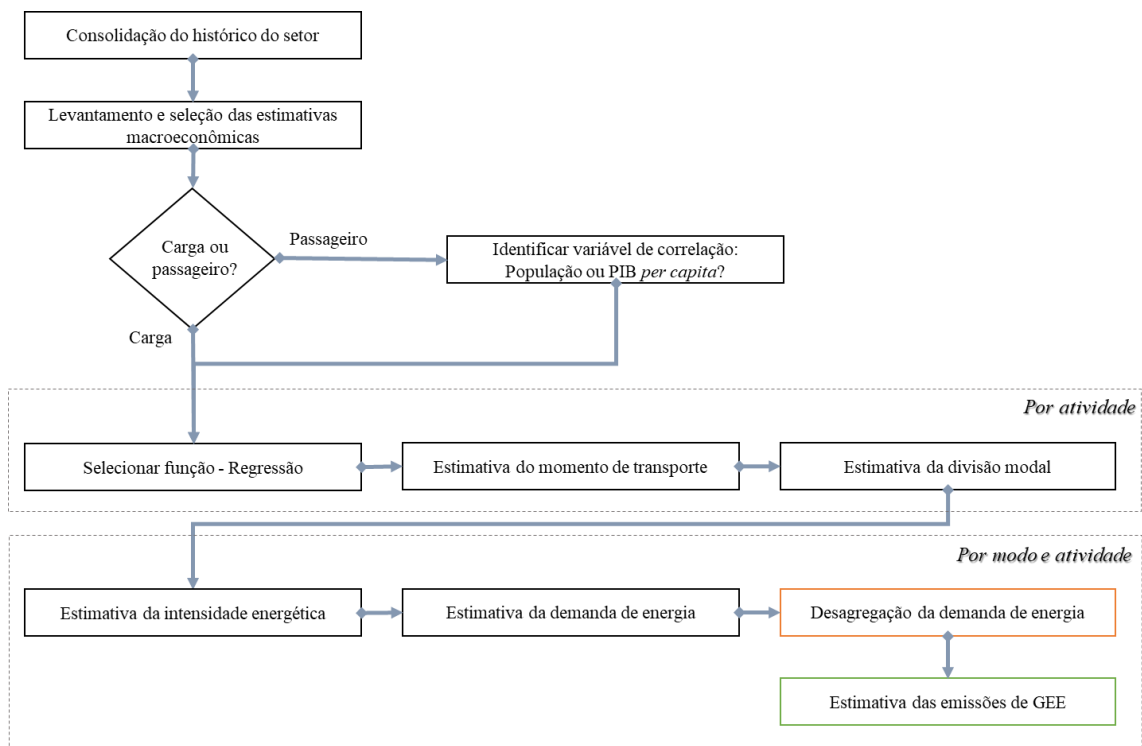
Com isso, a partir de um nivelamento inicial, da apresentação da narrativa dos cenários e apresentação dos desafios e dos impactos diretos e indiretos das ações de mitigação propostas, tem-se subsídios para consolidar a opinião do grupo selecionado e ajustar as premissas e hipóteses com base nesse consenso, incorporando as premissas nas projeções de atividade, energia e emissões futuras.

5.3 Fase 3: Elaboração dos cenários

Esta fase tem como objetivo a elaboração de, pelo menos, dois cenários: um tendencial (BAU) e um alternativo. O Cenário BAU é utilizado para indicar as estimativas para uma evolução conservadora do setor, considerando somente obras e políticas em andamento e a tendência do setor, enquanto o(s) Cenário(s) Alternativo(s) usualmente indicam a aplicação de medidas mais ambiciosas de mitigação. Assim, o objetivo de considerar ambos os cenários é comparar e avaliar os efeitos das ações de mitigação no consumo energético e nas emissões de GEE.

A primeira atividade da Fase 3 é o levantamento de estimativas macroeconômicas por meio de relatórios de referência (por exemplo, do Fundo Monetário Internacional – FMI). A partir disso, parte-se para aplicação da abordagem ASIF para estimar o consumo energético e emissões de GEE ao longo do horizonte temporal analisado.

Essa etapa metodológica, ilustrada na Figura 5.5, se difere da primeira abordagem ASIF em relação ao propósito e estrutura (que passa a ser a proposta por SCHIPPER *et al.*, 2000), pois busca projetar os dados de atividade com base em uma variável macroeconômica (por exemplo, PIB, PIB *per capita*, população etc.) que melhor explique o comportamento do transporte de carga e passageiros, a ser definida por meio da análise de diversas funções e seu coeficiente de determinação. Ainda, uma análise *Top-down* pode ser realizada, de forma complementar, por meio de uma estimativa paramétrica a partir das variáveis macroeconômicas e/ou utilizando estimativas futuras de estudos exógenos.



Fonte: Elaboração própria

Figura 5.5: Abordagem ASIF para estimativas futuras.

Para estimativa das emissões de GEE, utiliza-se fatores de emissão, multiplicando-os à energia consumida pelo fator específico do gás analisado (no caso, CO₂, CH₄ e N₂O). Após a aplicação das abordagens e obtenção dos dados de emissões atmosféricas e consumo energético, verifica-se a disponibilidade de dados para a aplicação da abordagem *Bottom-up*, seguindo os passos apresentados na Figura 5.3 e, em caso de falta de dados detalhados, seguem-se os passos apresentados na Figura 5.4. Neste caso, porém, são consideradas variáveis (licenciamento anual por tipo de veículo e tecnologia etc.) estimadas com base em premissas, hipóteses, variáveis macroeconômicas (População, PIB etc.) e do momento de transporte estimado para o transporte rodoviário.

Caso seja viável aplicar a abordagem *Bottom-up* para a projeção futura, são calibrados os resultados dessa abordagem com os obtidos na ASIF para o modo rodoviário e *Top-down* para os demais modos. Outrossim, verifica-se a consistência dos dados, eliminando valores fora do intervalo observado na literatura (por exemplo, de intensidade energética) e capacidade de produção/importação (biocombustíveis), conforme indicado na subseção 2.5.

Os resultados obtidos devem ser confrontados com a oferta dos setores de AFOLU e Geração de Energia para verificar a viabilidade de atendimento da demanda energética estimada para cada combustível, biocombustível, além de eletricidade. Essa verificação pode ser realizada por meio de uma revisão documental, avaliando a capacidade produtiva atual e futura e/ou por meio de estudos multissetoriais de cenários prospectivos ou até mesmo estudos com foco na geração de energia.

Além disso, caso haja disponibilidade no país analisado, é possível validar as estimativas do momento de transporte em modelos multissetoriais de equilíbrio geral. Tais modelos avaliam os impactos macroeconômicos e sociais de cenários e narrativas, considerando as demandas e capacidades de atendimento de cada setor, corrigindo o momento de transporte inicialmente estimado, caso necessário.

A próxima etapa é a estimativa dos indicadores para todo o período da projeção ou um intervalo desejado. Nesse sentido, comparam-se os resultados do Cenário BAU com o(s) Cenário(s) Alternativo(s). Como abordado, essa etapa é importante para avaliar a eficácia das ações de mitigação, permitindo, portanto, a elaboração de um *ranking* de medidas com base no potencial de mitigação nas emissões do setor de transportes.

Se os resultados estiverem alinhados com o objetivo do cenário (NDC, NAMA etc.), divulgam-se os resultados e pode-se aplicar, por exemplo, o método de Mensuração, Relato e Verificação (MRV) com o objetivo de periodicamente verificar a aderência dos resultados de mitigação com os objetivos preestabelecidos. Caso os resultados não estejam alinhados com o objetivo do cenário (bem acima ou abaixo do estipulado), deve-se rever as premissas e hipóteses aferidas pelos especialistas, ajustando os níveis de ambição conforme aderência ao objetivo do cenário.

5.4 Considerações finais do capítulo

Este Capítulo buscou discutir as etapas do TEMA para estimar as emissões de GEE, consumo energético e a atividade do setor de transportes, tanto para a aferição do histórico e linha de base como para as trajetórias futuras dessas variáveis de saída do modelo.

Dado que o método proposto considera uma aplicação generalista, optou-se por apresentar uma descrição abrangente de possíveis aplicações. Ressalta-se que as

atividades de cada etapa variam conforme o contexto de disponibilidade de dados e característica de cada país. Isto posto, para efeito desta tese, os detalhes do método (curva de sucateamento, intensidade de uso etc.) são abordados no Capítulo 6, uma vez que, pretende-se expor a funcionalidade do método para em um Cenário em que o planejador irá buscar os dados, bem como identificar a melhor abordagem para estimar atividade, energia e emissões, com base nos dados levantados.

O ineditismo do método foi identificado nas revisões sistemática, documental e narrativa dos Capítulos 3 e 4. Por exemplo: ao apresentar detalhadamente os passos para elaboração dos cenários; ao calibrar os resultados de emissões, atividade e consumo energético da abordagem *Bottom-up* com os resultados das abordagens *Top-down* e/ou ASIF; ao considerar todos os modos de transporte; ao discutir premissas e hipóteses, por meio de grupo focal, com especialistas e demais interessados no setor de transportes; ao estimar uma linha de base (e histórico) mediante analogia com o momento de transporte e ajustes com base na intensidade energética identificada na literatura.

Portanto, há condições viabilizadoras para aplicação o método proposto em um experimento de modelagem de emissões, energia e atividade, considerando dados do Brasil que será apresentada no próximo Capítulo.

6 CENÁRIOS PROSPECTIVOS DO SETOR DE TRANSPORTES BRASILEIRO

O Brasil possui uma população estimada de 212 milhões de habitantes, uma taxa de urbanização de 84,4% e uma área total de 8.510820,62 km², dividida entre 5.570 municípios distribuídos em 27 unidades federativas (IBGE, 2019). Historicamente, apesar de ser um país não-Anexo I (EPHRAUMS e JENKINS, 1992), o Brasil possui uma posição de liderança nos esforços globais para mitigar as emissões de GEE, apresentando metas de redução de emissões ambiciosas para 2030.

Sendo assim, o país reportou quatro Comunicações Nacionais à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (MCTI, 2020) e desenvolveu programas nacionais de incentivo ao uso de biocombustíveis (por exemplo, RenovaBio) e de melhoramento da eficiência energética de veículos automotores (por exemplo, Inovar-auto e Rota 2030). Ainda, o Brasil apresenta uma participação de renováveis na oferta interna de energia de cerca de 48,4%, sendo três vezes e meia maior que a média mundial e mais de quatro vezes dos países da OCDE (EPE, 2021).

Como resultado dessas ações, as reduções líquidas de emissões alcançadas por alguns setores já foram contabilizadas, sendo a maior parte das mitigações derivadas do setor de AFOLU. Contudo, o recente avanço do desmatamento em áreas protegidas na Amazônia brasileira (NOGUEIRA *et al.*, 2018; SILVA JUNIOR, 2018) e das áreas de plantio (café, cana de açúcar, soja etc.) podem comprometer o alcance das metas de redução de emissões do setor para o futuro (SOUZA-NETO *et al.*, 2018). Ainda, o atual Governo Federal tem sinalizado a interrupção de estratégias de desenvolvimento de baixo carbono ou redução de suas ambições (INOUYE *et al.*, 2019).

Isto posto, é relevante que sejam desenvolvidos cenários nos quais diferentes setores de atividade econômica tenham a responsabilidade de intensificar a redução de emissões,

bem como de auxiliar eventuais ausências de modo a suplementar caso AFOLU não atinja as metas de mitigação declaradas na NDC. Portanto, um dos setores-chave a ser analisado é o de transportes dada sua representatividade na demanda energética (EPE, 2021) e nas emissões de GEE (MCTI, 2020).

A NDC brasileira, versão atualizada⁹ em fevereiro de 2022, busca cortes de 37% nas emissões de GEE até 2025 e 50% até 2030 em comparação com os níveis de 2005 estimados no 4º Inventário Nacional (MCTI, 2020). Além disso, indica o alcance da neutralidade climática (zerar as emissões líquidas) em 2050. No entanto, a contribuição quantitativa do setor de transportes no alcance deste compromisso não é clara em nenhuma das atualizações/revisões da NDC, devido à inexistência de metas específicas.

Para definir as premissas globais e locais que melhor representem as políticas governamentais, iniciativas privadas e demandas da sociedade até 2050, é importante analisar os compromissos nacionais que já foram firmados e a possibilidade de serem atendidos. Dessa forma, esse Capítulo busca desenvolver um cenário compatível com o Acordo de Paris para o setor de transportes até 2050, considerando os compromissos assumidos pelo Brasil. Para isso, é estruturado o histórico do setor e, a partir do seu entendimento, são modelados dois cenários de uso de energia e de emissões de GEE, sendo um o BAU e um que busca do Desenvolvimento Sustentável.

6.1 Estruturação do histórico do setor

Quanto aos procedimentos técnicos para coleta de dados, realizou-se uma pesquisa bibliográfica baseada em livros e artigos científicos e uma pesquisa documental em base

⁹ Segunda atualização realizada pelo governo federal em relação a primeira iNDC comunicada pelo Brasil à UNFCCC desde que o Acordo de Paris entrou em vigor em 2016 (Unterstell e Martins, 2022).

de dados, relatórios e documentos técnicos, em sua maioria de associações setoriais nacionais, ministérios e de instituições de renome. Ambas as pesquisas tiveram por objetivo levantar dados e traçar o histórico dos programas desenvolvidos no setor de transportes brasileiro. A Tabela 6.1 apresenta os dados levantados e suas respectivas fontes.

Tabela 6.1: Dados necessários para aplicação do método proposto

Dados coletados e estimados		Fonte	
Dados macroeconômicos	População	IBGE (2021), Banco Mundial	
	PIB		
Demanda energética anual	Por modo e atividade	EPE (2021), MMA (2013), ANTT (2012), ANAC (2019)	
Características dos combustíveis e biocombustíveis	Fator de conversão	ANP (2020) e EPE (2021)	
	Densidade		
	Composição	ANP (2020), EPE (2021) e MCTI (2020)	
	Poder calorífico	ANP (2020) e EPE (2021)	
Inventário de emissões	Contemplando todos os setores econômicos	MCTI (2020)	
	Coefficiente AR5 - Global Warming Potential (GWP)	Allen et al., 2014	
	Inventário por modo de transporte e atividade	MCTI (2020), MMA (2013), (ANTT (2012), ANAC (2019)	
	Fatores de emissão	CETESB (2019), MCTI (2020), MMA (2013), ANTT (2012), ANAC (2019)	
Transporte de passageiros	Aéreo	Momento de transporte	ANAC (2021), EPE (2012), McKinsey & Company (2010), GEIPOT (2001)
		Passageiros transportados	ANAC (2021)
		Quilometragem média por viagem	Estimado com valores de ANAC (2021)
		Intensidade energética ou coeficiente de consumo	Estimado a partir dos dados de ANAC (2021), EPE (2012 e 2021), McKinsey & Company (2010), GEIPOT (2001) e validado com valores de referência na literatura
		Momento de transporte total (transporte urbano + navegação interior)	ANTAQ (2013 E 2018), EPE (2012), GEIPOT (2001), Data.Rio (2021)
	Aquático	Intensidade energética média (transporte urbano + navegação interior)	Estimado a partir dos dados de ANTAQ (2013 E 2018), EPE (2012 e 2021), GEIPOT (2001) e validado com valores de referência na literatura
		Momento de transporte – urbano	EPE (2012), GEIPOT (2001), Data.Rio (2021)
		Passageiros transportados – urbano	
		Quilometragem média por viagem - urbano	Data.Rio (2021) e CCR Barcas (2019)
		Intensidade energética ou coeficiente de consumo - urbano	

	Dados coletados e estimados	Fonte
Ferroviário	Momento de transporte - Navegação interior	ANTAQ (2013 e 2018), EPE (2012), GEIPOT (2001), Data.Rio (2021)
	Passageiros transportados - Navegação interior	
	Quilometragem média por viagem - Navegação interior	ANTAQ (2013 e 2018)
	Intensidade energética ou coeficiente de consumo	Estimado a partir dos dados da ANTAQ (2013 e 2018) e EPE (2012 e 2021) e validado com valores de referência na literatura
	Momento de transporte total	EPE (2012), GEIPOT (2001), CNT (2016), ANP trilhos (2021)
	Intensidade energética	Estimado a partir dos dados de EPE (2012 e 2021), GEIPOT (2001), CNT (2016), ANP trilhos (2021) e validado com valores de referência na literatura
	Momento de transporte – metrô	Estimado a partir dos dados da CNT (2016) e ANP trilhos (2020)
	Passageiros transportados – metrô	CNT (2016) e ANP trilhos (2021)
	Quilometragem média por viagem - metrô	Estimado a partir dos dados da CNT (2016) e ANP trilhos (2020)
	Intensidade energética ou coeficiente de consumo - metrô	Estimado a partir dos dados da ANP trilhos (2020) e MetrôRio (2016) e validado com valores de referência da literatura
	Momento de transporte - trens urbanos	Estimado a partir dos dados da CNT (2016) e ANP trilhos (2020)
	Passageiros transportados - trens urbanos	CNT (2016) e ANP trilhos (2021)
	Quilometragem média por viagem - trens urbanos	Estimado a partir dos dados da CNT (2016) e ANP trilhos (2020)
	Intensidade energética ou coeficiente de consumo - trens urbanos	Estimado a partir dos dados da ANP trilhos e Supervia Trens Urbanos (2017) e validado com valores de referência da literatura
	Momento de transporte – VLT	Estimado a partir dos dados da CNT (2016) e ANP trilhos (2020)
	Passageiros transportados – VLT	CNT (2016) e ANP trilhos (2021)
Quilometragem média por viagem - VLT	Estimado a partir dos dados da CNT (2016) e ANP trilhos (2020)	
Intensidade energética ou coeficiente de consumo - VLT	Estimado a partir dos dados da ANP trilhos (2020) e validado com valores de referência da literatura	
Rodoviário	Momento de transporte total	Estimado a partir de EPE (2012), GEIPOT (2001), ANTP (2018), NTU (2018)
	Intensidade energética	Estimado a partir dos dados da EPE (2012 e 2021), GEIPOT (2001), FENABRAVE (2021) e validado com valores de referência na literatura
	Estimativa da frota circulante por tipo de veículo, tecnologia e ano de fabricação	Estimado a partir das vendas/licenciamento por tipo de veículo

		Dados coletados e estimados	Fonte	
Transporte de carga		Vendas/licenciamento por tipo de veículo ¹⁰ , tecnologia ¹¹ e ano de fabricação	ABEIFA (2021), ABRACICLO (2021), ANFAVEA (2021), FENABRAVE (2021), MINFRA (2021) e FABUS (2021)	
		Coeficiente de consumo por tipo de veículo, tecnologia e ano de fabricação	CETESB (2019), PBEV (2021), Gonçalves et al. (2019b), estatísticas de vendas/licenciamento	
		Intensidade de uso por tipo de veículo, tecnologia e ano de fabricação	MMA (2013), Gonçalves et al. (2019b)	
		Ocupação média por tipo de veículo, tecnologia e ano de fabricação	Estimado a partir das estimativas do momento de transporte e frota circulante e validados por meio de workshops (Apêndice I) e NTU (2018)	
		Passageiros total transportado - transporte público	ANTP (2018) e NTU (2018)	
		Quilometragem média por viagem - transporte público	ANTP (2018), NTU (2018) e autor	
		Momento de transporte	ANAC (2021), EPE (2012), GEIPOT (2001)	
	Aéreo	Carga movimentada		
		Quilometragem média por viagem	Estimado com valores de ANAC (2021)	
		Intensidade energética ou coeficiente de consumo	Estimado a partir dos dados da ANAC (2021) e EPE (2012 e 2021) e EPE e validado com valores de referência na literatura	
		Aquático	Momento de transporte - cabotagem	ANTAQ (2018, 2020 e 2021) e EPE (2012), GEIPOT (2001)
			Carga movimentada - cabotagem	ANTAQ (2020 e 2021), EPL (2020)
			Quilometragem média por viagem - cabotagem	Estimado com valores da ANTAQ (2021)
			Intensidade energética ou coeficiente de consumo	Estimado a partir dos dados de ANTAQ (2020 e 2021) e EPE (2012 e 2021), e validado com valores de referência na literatura
Momento de transporte - Navegação interior	ANTAQ (2019 e 2021) e EPE (2012), GEIPOT (2001)			
Carga movimentada - Navegação interior	ANTAQ (2020 e 2021)			
Quilometragem média por viagem - Navegação interior	Estimado com valores da ANTAQ (2021)			
Intensidade energética ou coeficiente de consumo	Estimado a partir dos dados de ANTAQ (2020 e 2021) e EPE (2012 e 2021), e validado com valores de referência na literatura			

¹⁰ Automóvel (com motor menor ou igual a 1.0; motor entre 1.1 e 1.9, inclusive; e motor igual ou superior a 2.0), comercial leve (motor entre 1.4 e 1.9; motor igual ou superior a 2.0), motocicleta (menor ou igual a 150 cilindradas, e maiores que 150) e ônibus (micro, urbano básico, urbano *padron* e rodoviário).

¹¹ Ciclo Otto (dedicado à gasolina, dedicado a etanol, *flexible-fuel* e convertidos a gás natural veicular); Ciclo Diesel (dedicado a diesel e dedicado a etanol), elétrico a bateria, híbrido elétrico (em série e em paralelo, *plug-in* e não *plug-in*), pilha combustível etc.

	Dados coletados e estimados	Fonte
Dutoviário	Momento de transporte total	EPL (2021a e 2020), MTPA (2018), GEIPOT (2001), EPE (2012)
	Intensidade energética	Estimado a partir dos dados de EPL (2021a e 2020), MTPA (2018), GEIPOT (2001), EPE (2012 e 2021) e validado com valores de referência na literatura
	Momento de transporte - mineroduto	Estimado a partir dos dados de EPL (2021a), MTPA (2018) e EPE (2012)
	Carga movimentada - mineroduto	EPL (2021a) e MTPA (2018)
	Quilometragem média por viagem - mineroduto	EPL (2021a) e MTPA (2018)
	Intensidade energética ou coeficiente de consumo - mineroduto	Estimado a partir dos dados de EPL (2021a), MTPA (2018) e EPE (2012) e validado com valores de referência na literatura
	Momento de transporte - gasoduto	Estimado a partir dos dados de EPL (2021a), MTPA (2018) e EPE (2012)
	Carga movimentada - gasoduto	EPL (2021a) e MTPA (2018)
	Quilometragem média por viagem - gasoduto	EPL (2021a) e MTPA (2018)
	Intensidade energética ou coeficiente de consumo - gasoduto	Estimado a partir dos dados de EPL (2021a), MTPA (2018) e EPE (2012) e validado com valores de referência na literatura
	Momento de transporte - oleoduto	Estimado a partir dos dados de EPL (2021a), MTPA (2018) e EPE (2012)
	Carga movimentada - oleoduto	EPL (2021a) e MTPA (2018)
	Quilometragem média por viagem - oleoduto	EPL (2021a) e MTPA (2018)
	Intensidade energética ou coeficiente de consumo - oleoduto	Estimado a partir dos dados de EPL (2021a), MTPA (2018) e EPE (2012) e validado com valores de referência na literatura
	Ferroviário	Momento de transporte total
Intensidade energética		Estimado a partir dos dados de ANTT (2021), GEIPOT (2001), EPE (2012 e 2021) e validado com valores de referência na literatura
Momento de transporte por ferrovia		ANTT (2021)
Intensidade energética ou coeficiente de consumo por ferrovia		Estimado a partir dos dados de ANTT (2012 e 2021) e EPE (2021), e validado com valores de referência na literatura
Carga movimentada por ferrovia		ANTT (2021)
Quilometragem média por viagem		Estimado a partir dos dados da ANTT (2021)
Rodoviário	Momento de transporte total	Estimado a partir de EPE (2012), GEIPOT (2001), EPL (2021a), ANTT (2021), Almeida <i>et al.</i> (2017), NTC & Logística (2019).
	Intensidade energética	Estimado a partir dos dados da EPE (2012 e 2021), GEIPOT (2001), FENABRAVE (2021) e validado com valores de referência na literatura
	Estimativa da frota circulante por tipo de veículo, tecnologia e ano de fabricação	Estimado a partir das vendas/licenciamento por tipo de veículo

Dados coletados e estimados	Fonte
Vendas/licenciamento por tipo de veículo ¹² , tecnologia ¹³ e ano de fabricação	ABEIFA (2021), ABRACICLO (2021), ANFAVEA (2021), FENABRAVE (2021)
Coefficiente de consumo por tipo de veículo, tecnologia e ano de fabricação	CETESB (2019), PBEV (2021), Gonçalves <i>et al.</i> (2019b), estatísticas de vendas/licenciamento
Intensidade de uso por tipo de veículo, tecnologia e ano de fabricação	MMA (2013), Gonçalves <i>et al.</i> (2019b)
Ocupação média por tipo de veículo, tecnologia e ano de fabricação	Estimado a partir das estimativas do momento de transporte e frota circulante e validados por meio de NTC & Logística (2019) e PLVB (2019).

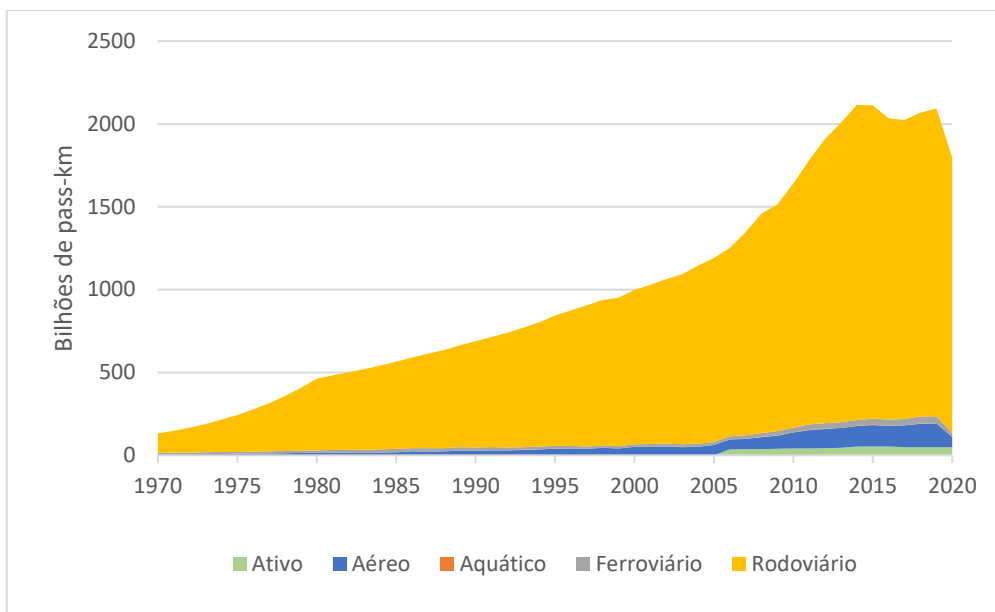
Fonte: Elaboração própria

O horizonte temporal do histórico cobre o período entre 1970 e 2020. No entanto, especificamente no caso da estimativa da frota circulante, os dados de licenciamento por tipo de veículo, categoria e tecnologia foram coletados a partir de 1957. Desse modo, a modelagem e análise de algumas informações em um horizonte de tempo superior assegura uma maior consistência dos dados.

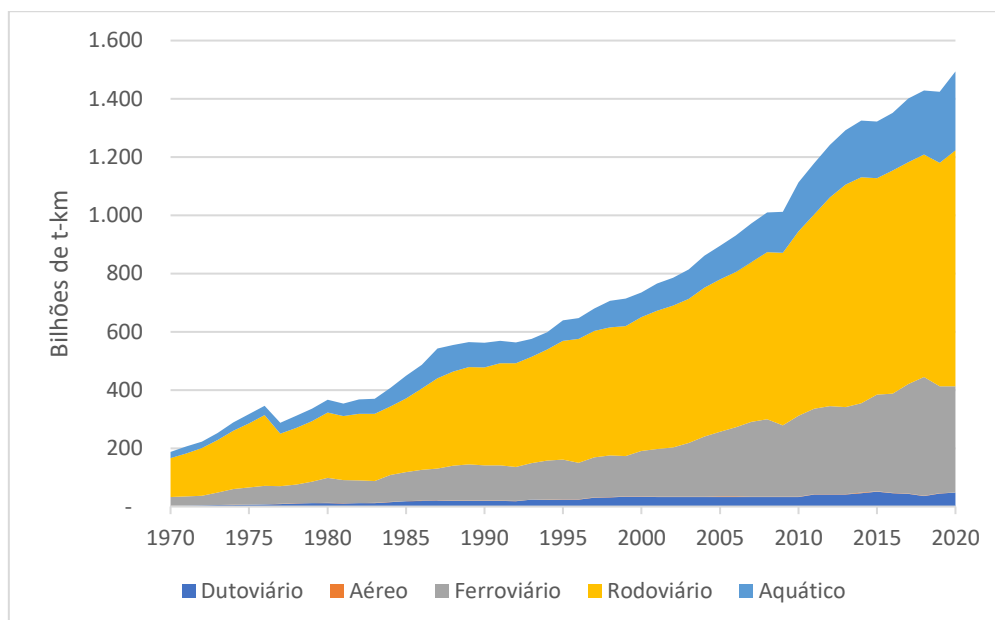
A partir da análise e consolidação dos dados apontados na Tabela 6.1, foi possível estimar, por meio da aplicação da Fase I do TEMA, e validar o momento de transporte de passageiros (Figura 6.1a) e carga (Figura 6.1b) a partir da intensidade energética (Tabela 6.2) e da correlação com PIB *per capita* nacional, no caso de passageiros (Figura 6.2a), e PIB, no caso de cargas (Figura 6.2b).

¹² Comerciais leves, Caminhão (semileve, leve, médio, semipesado e pesado) e motocicletas.

¹³ Ciclo Diesel (dedicado a diesel e dedicado a etanol), Ciclo Otto (Dedicado a gasolina, dedicado a etanol e *flexible-fuel*) elétrico a bateria, híbrido elétrico (em série e em paralelo), pilha combustível etc.



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria

Figura 6.1: Evolução da atividade de passageiros (a) e carga (b) por modo de transporte

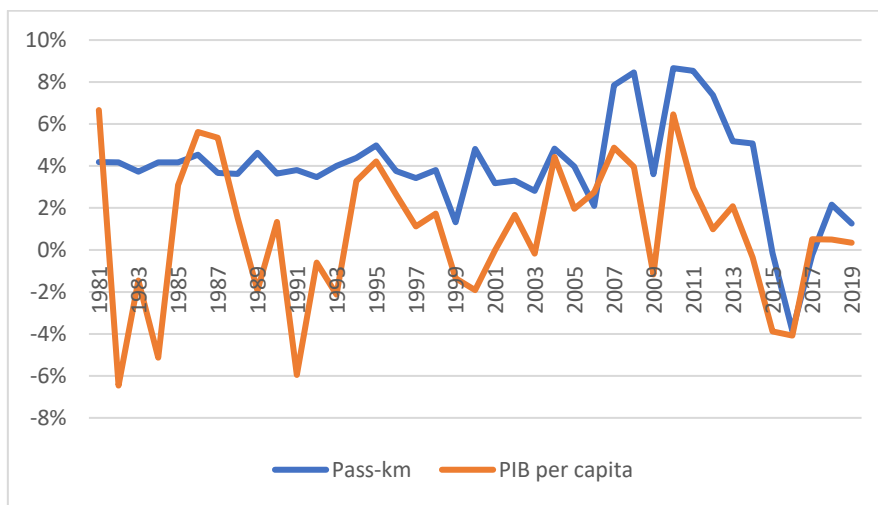
Tabela 6.2: Intervalos de intensidade energética por modo e atividade de transporte

Atividade	Modo de transporte	Intensidade energética - literatura	Intensidade energética média ¹ estimada
		kJ/pass-km	
Passageiros	Aéreo	1.252 - 4.600	1.312 - 3.649
	Aquático	780 - 6.476	2.273 - 4.392
	Ferrovário	180 - 450	222 - 259
	Rodoviário	260 - 3.100	1.074 - 1.116
Cargas	Modo de transporte	kJ/t-km	

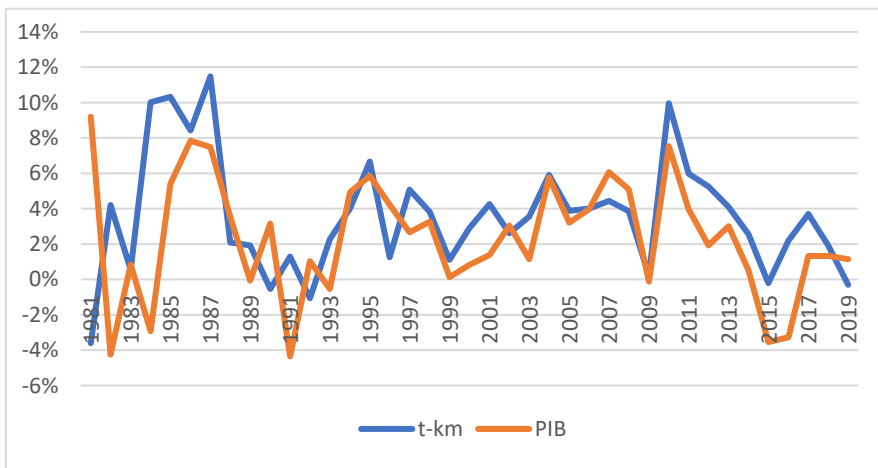
Atividade	Modo de transporte	Intensidade energética - literatura	Intensidade energética média ¹ estimada
		kJ/pass-km	
	Aéreo	6.900 - 24.300	13.362 - 21.116
	Aquático	163 - 1.138	298 - 542
	Dutoviário	101 - 1.050	165 - 298
	Ferrovário	70 - 450	140 - 144
	Rodoviário	395 - 2.500	1.632 - 1.689

Legenda: ¹2005-2020 e 1990-2004.

Fonte: Elaboração própria a partir de Hay (1961), Hughes (1994), Morlok (1978), Ristnen e Kraushaar (1999), D'Agosto e Ribeiro (2004), Davis *et al.* (2009), D'Agosto e Ribeiro (2009), NRC (2010), EPE (2013), IEA (2021).



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria

Figura 6.2: Variação anual – (a) pass-km x PIB *per capita* e (b) t-km x PIB

Flutuações similares ocorrem, principalmente após 1994, para passageiros e, a partir de 1985, para carga, apresentando um coeficiente de determinação de 0,91 para passageiros e 0,97 para carga. O mesmo fenômeno ocorre entre a evolução das vendas de veículos, leves e pesados, e o PIB (GONÇALVES e D'AGOSTO, 2018). Dessa forma, tendo em vista a forte correlação entre a atividade de transportes de passageiros e o PIB *per capita* e entre a atividade de transportes de carga e o PIB (FAÇANHA *et al.*, 2012; EPE, 2016; VANEK *et al.*, 2014), essas variáveis serão consideradas para estimar a atividade do setor até 2050.

Analisando a Figura 6.1a, observa-se que a atividade de transportes de passageiros cresceu cerca de 16 vezes (1970-2019), tendo um crescimento médio de 13% a.a. entre 1970 e 1980; 4% a.a. entre 1980 e 2000; 5% entre 2000 e 2014; e estagnou entre 2015 e 2019. A partir de 2019, houve queda de cerca de 15% devido às restrições relacionadas ao combate da pandemia de Covid-19.

No caso do transporte de carga, sua atividade cresceu cerca de 8 vezes (1970-2020), tendo um crescimento médio de 7% a.a. entre 1970 e 1980; 4% a.a. entre 1980 e 1990; 3% entre 1990 e 2020; 4% a.a. entre 2000-2014; e 2% a.a. entre 2014-2020. Em ambos os casos, o modo predominante foi o rodoviário, representando em média 93% da atividade de passageiros e 61% da de carga.

A Tabela 6.3 apresenta as abordagens consideradas para cada modo e tipo de atividade ao longo do histórico para estimativa e calibração e estudos de referência para validação.

Tabela 6.3: Abordagens utilizadas por atividade e modo de transporte.

Atividade	Modo	Período	Abordagem principal	Abordagem adicional	Tier	Validação
Passageiros	Aéreo	1970-2020	ASIF	<i>Top-down</i>	2	ANAC (2019)
	Aquático	1970-2020	<i>Bottom-up</i> ¹	<i>Top-down</i>	2	ANTAQ (2013 e 2018) EPE (2012)
	Ativo	2006-2020	<i>Bottom-up</i> ¹	<i>Top-down</i>	-	ANTP (2018)
	Ferroviário	1970-2009	ASIF	<i>Top-down</i>	-	EPE (2012)
		2010-2020	<i>Bottom-up</i> ¹	ASIF e <i>Top-down</i>	-	CNT (2016)
Rodoviário	1957-2020	<i>Bottom-up</i> ²	ASIF e <i>Top-down</i>	2 e 3	MMA (2013)	
Carga	Aéreo	1970-2020	ASIF	<i>Top-down</i>		
	Aquático	1970-2020	ASIF	<i>Top-down</i>	2	EPE (2012)
	Dutoviário	1980-1996; 2001-2008	ASIF	<i>Top-down</i>	-	GEIPOT (2001)
		1996-2000; 2009-2020	<i>Bottom-up</i> ¹	ASIF e <i>Top-down</i>	-	MTPA (2018)
	Ferroviário	1970-2005	ASIF	<i>Top-down</i>	2	EPE (2012)
		2006-2020	<i>Bottom-up</i> ¹	ASIF e <i>Top-down</i>	2	ANTT (2012 e 2021)
Rodoviário	1957-2020	<i>Bottom-up</i> ²	ASIF e <i>Top-down</i>	2 e 3	MMA (2013)	

Legenda: ¹Abordagem ilustrada na Figura 5.4; ² Abordagem ilustrada na Figura 5.3

Fonte: Elaboração própria

A frota circulante do modo rodoviário foi estimada por meio da aplicação da função de sucateamento sobre as vendas anuais para os diferentes tipos de veículos e tecnologias. Sendo assim, para automóveis e comerciais leves (exceto os do ciclo Diesel), são as utilizadas as do Serviço de Planejamento da PETROBRAS, calibradas pelos dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), resultando na função Gompertz (PNAD, 1988 *apud* MMA, 2013).

Para comercial leve do ciclo Diesel, ônibus e caminhões, as curvas de sucateamento adotadas são a função logística calibrada a partir de dados de idade média e de frota total de 1997 fornecidos pelo DENATRAN (MMA, 2013). No caso das motocicletas, historicamente é considerada a curva de sucateamento utilizada pelo SINDIPEÇAS (2009).

No entanto, os coeficientes utilizados nas curvas de sucateamento considerada nos estudos nacionais (por exemplo, MMA, 2013) são baseadas em estatísticas defasadas. Dessa forma, dada a necessidade de revisão desses coeficientes, instituições-chave como MCTI, Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR), Seguradora Líder e SINDIPEÇAS foram mobilizados para discutir o modelo e fornecer dados reais de veículos em circulação. Assim, optou-se pela utilização dos dados de veículos adimplentes e inadimplentes com o seguro de Danos Pessoais Causados por Veículos Automotores de Vias Terrestres (DPVAT) como estratégia de ajuste dos coeficientes das funções de sucateamento estabelecidas para a realidade brasileira, sendo fornecidos pela Superintendência de Seguros Privados (SUSEP) vinculada ao Ministério da Economia.

Para efeito deste estudo, considera-se como premissa que as funções utilizadas previamente representam o comportamento da vida útil de veículos equipados com motores do ciclo Diesel e Otto. Portanto, o foco foi na atualização, por meio de análise de sensibilidade, dos coeficientes (a) e (b) para veículos leves e (a) para veículos pesados, utilizando os veículos adimplentes e inadimplentes com o seguro DPVAT como referência.

Essa atualização considerou a análise da intensidade de uso e ocupação média por categoria de veículo para assegurar a consistência das estimativas. Isto posto, a Tabela 6.4 apresenta os coeficientes atualizados e as Equações 15 e 16 as funções Gompertz e Logística, respectivamente, utilizadas especificamente para essa aplicação.

Tabela 6.4: Intervalos de intensidade energética por modo e atividade de transporte

Descrição	Função	Valores de referência	Valores propostos
Automóveis e Comerciais leves (Ciclo Otto)	<i>Gompertz</i>	1,798 (<i>a</i>) e -0,137 (<i>b</i>)	1,798 (<i>a</i>) e -0,096 (<i>b</i>)
Caminhões	Logística	17,0 (<i>t₀</i>) e 0,10 (<i>a</i>)	19,1 (<i>t₀</i>) e 0,08 (<i>a</i>)
Comerciais leves – ciclo Diesel	Logística	15,3 (<i>t₀</i>) e 0,17 (<i>a</i>)	17,0 (<i>t₀</i>) e 0,17 (<i>a</i>)

$$S_{a,V_{md,k}} = \exp \{ - \exp [a + (b * t)] \} \quad \text{Equação 15}$$

$$ES_{A,V_{md,k}} = \frac{1}{\{1+\exp[a(t-t_0)]\}} + \frac{1}{\{1+\exp[a(t+t_0)]\}} \quad \text{Equação 16}$$

Em que,

$S_{a,V_{md,k}}$: é a fração de veículos sucateada na idade t ;

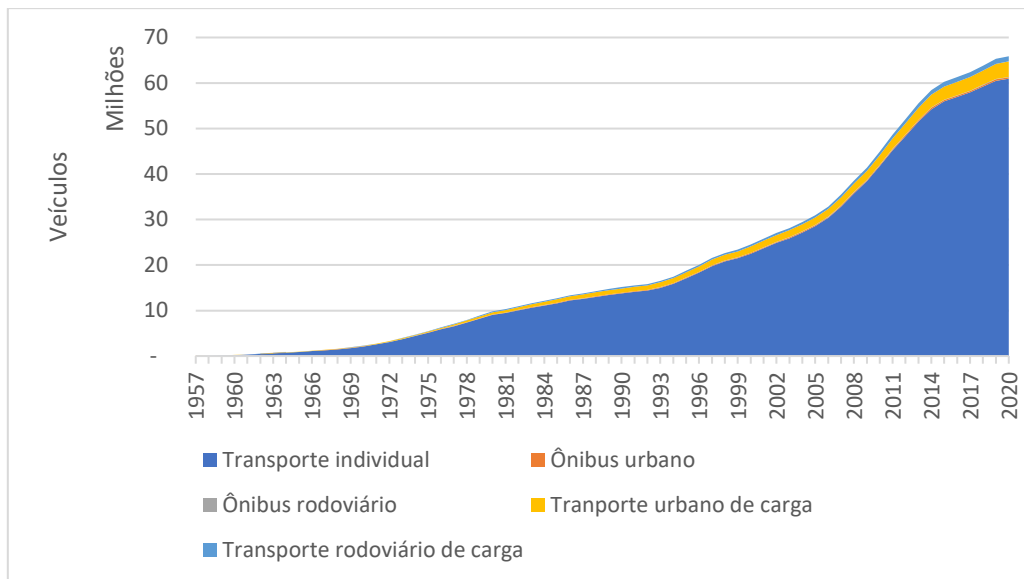
T : é a idade do veículo;

a : é o coeficiente de calibração;

b : é o coeficiente de calibração.

No caso específico das motocicletas, a atualização considerou os coeficientes 0,15 (*a*) e -0,175 (*b*) para motocicletas com até 4 anos de uso, e 0,80 (*a*) e -0,093 (*b*) para motocicletas com mais de 4 anos de uso.

De posse dos novos coeficientes, estimou-se a frota circulante por veículo e tecnologia, como apresentado na Figura 6.3 a Figura 6.8.



Legenda: Transporte individual (motocicletas, automóveis e comerciais leves); Transporte urbano de carga (comerciais leves, caminhões semileves, leves e médios); Transporte rodoviário de carga (caminhões médios, semipesados e pesados)

Figura 6.3. Estimativa da evolução da frota Circulante por tipo de veículo

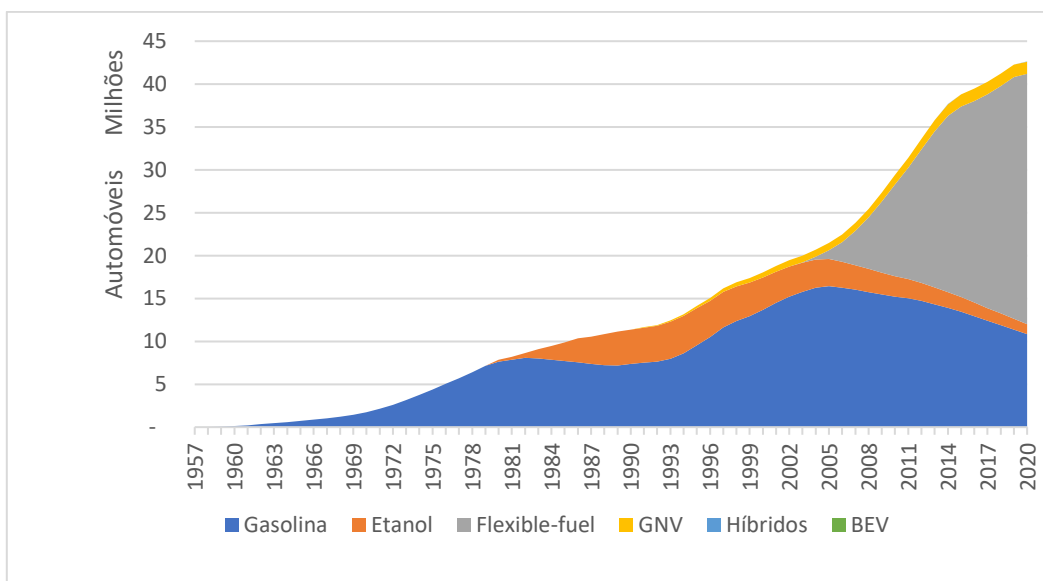


Figura 6.4 – Estimativa da evolução da frota Circulante de automóveis por tipo de tecnologia

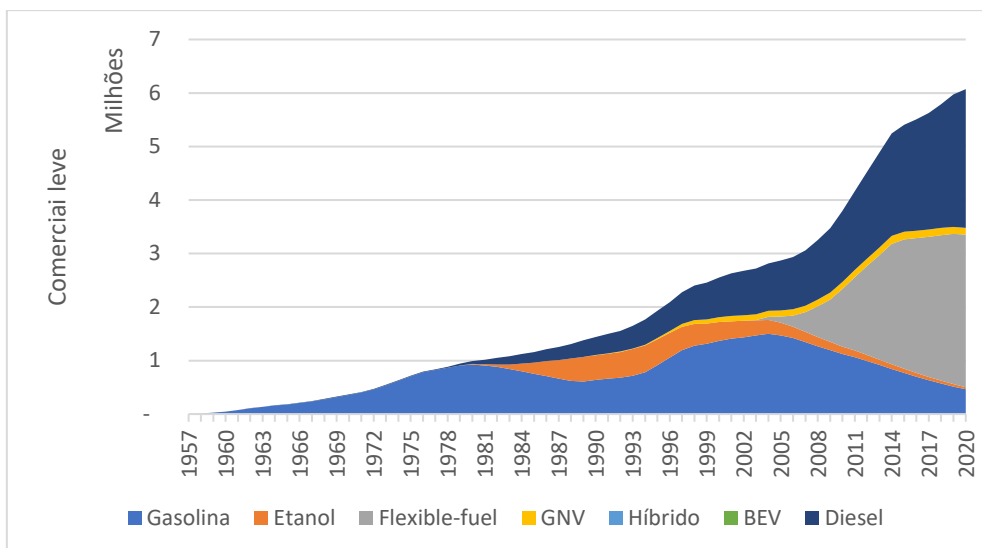


Figura 6.5 – Estimativa da evolução da frota Circulante de veículos comerciais leves por tecnologia

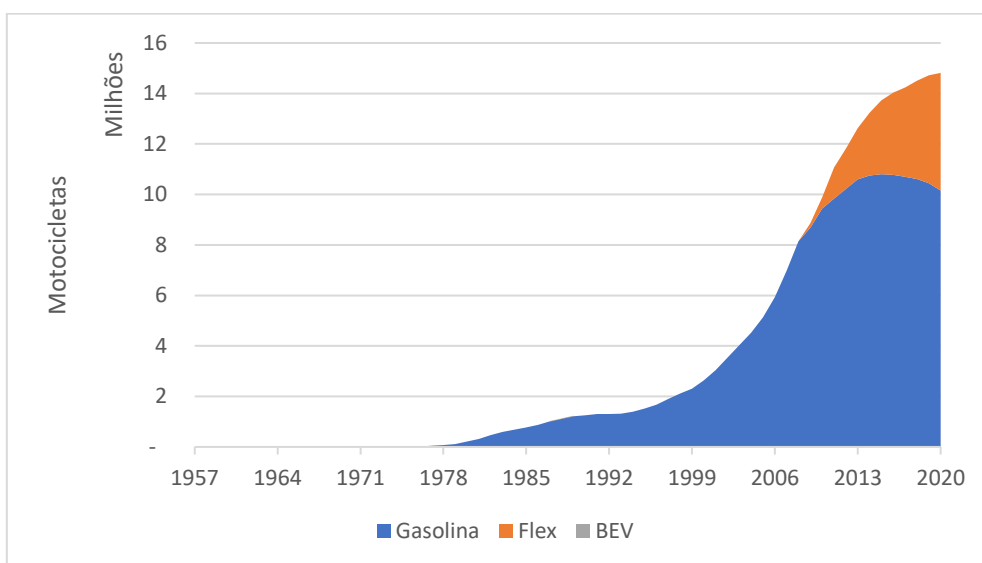


Figura 6.6 - Estimativa da evolução da frota Circulante de motocicletas por tecnologia

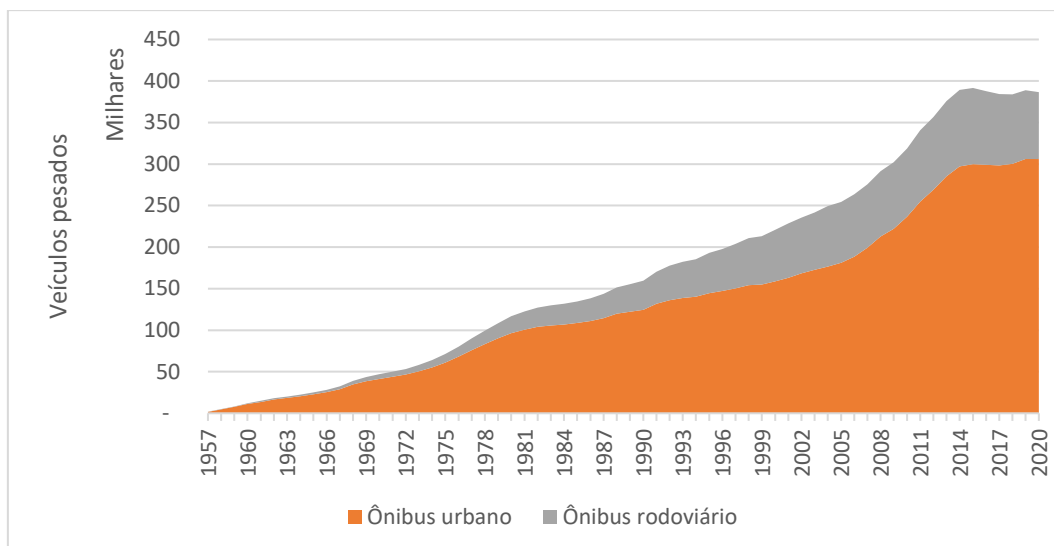


Figura 6.7 – Estimativa da evolução da frota Circulante de ônibus

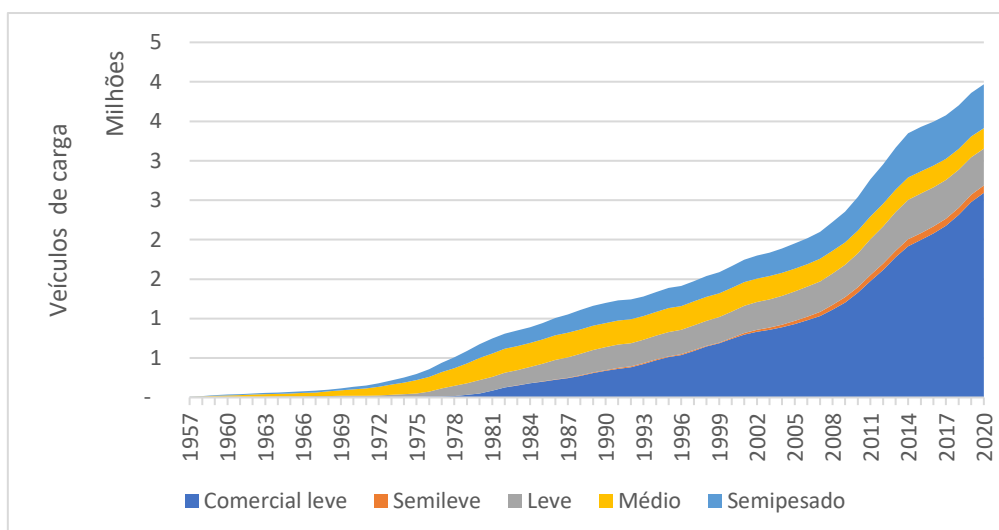


Figura 6.8 - Estimativa da evolução da frota circulante de comerciais leves e caminhões ciclo Diesel.

Em 2020, a frota circulante estimada foi de aproximadamente 51,1 milhões de veículos automotores, sendo composta majoritariamente por automóveis e comerciais leves (cerca de 90,3% do total). A frota estimada é 11,7% superior a estimada pela ANFAVEA (2021), tendo uma diferença menor em relação aos pesados (0,7%) e maior em relação aos leves (12,3%). Ainda, ao considerar motocicletas, a frota total passar a ser de 65,8 milhões de veículos.

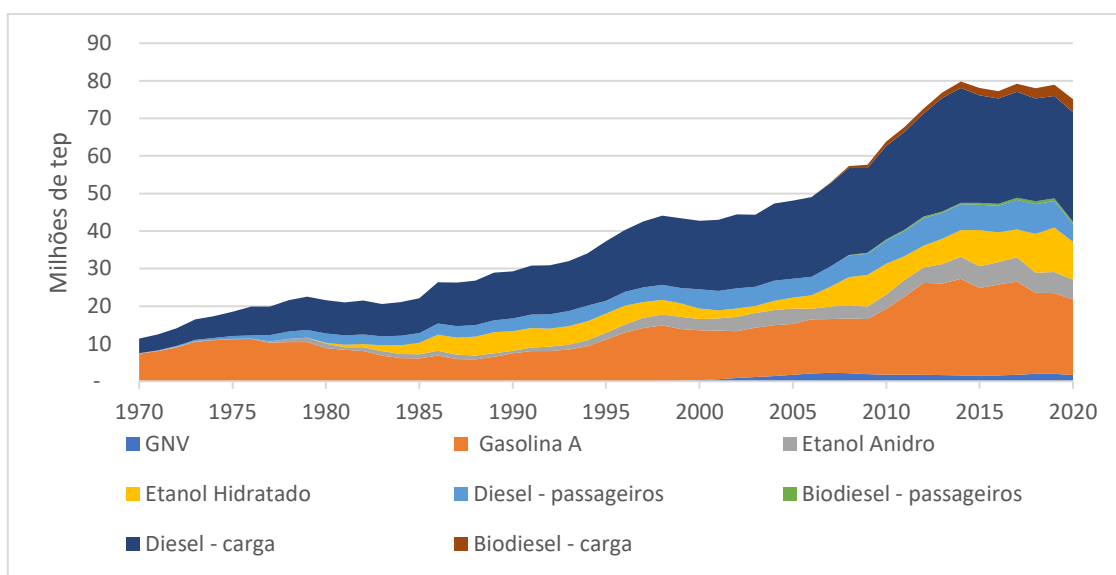
De posse dos resultados da frota circulante por veículo e tecnologia, foram estimados o consumo energético e o momento de transporte. No entanto, ao analisar as variáveis de entrada, verificou-se a necessidade de atualização do rendimento energético dos ônibus urbanos e dos caminhões (urbanos e rodoviários), bem como da intensidade de uso dos ônibus urbanos e a distribuição por categoria de ônibus (micro, urbano e rodoviário), devido a divergências dessas informações com o observado e relatado pelos operadores (Gonçalves *et al.*, 2019b).

Assim, com intuito de reduzir incertezas associadas à elaboração do inventário do modo rodoviário, uma vez que quanto maior a consistência das estimativas de rendimento energético dos veículos, menor os ajustes necessários na intensidade de uso e ocupação média dos veículos, o rendimento foi revisado para cada veículo, tecnologia e ano de fabricação por meio de consulta a *stakeholders* (Apêndice I), contato direto com representante de montadoras representativas no mercado nacional, análise de estudos de referência (variáveis de rendimento energético de referência por tipo de veículo e montadora que opera no país) e dados de associações do transporte coletivo de passageiros e do transporte de carga. O estudo Gonçalves *et al.* (2019b), detalha todo protocolo considerado para os ônibus e caminhões, bem como apresenta a evolução do rendimento energético ao longo do histórico de vendas.

Quanto a intensidade de uso dos ônibus urbanos e micros, verifica-se que a base anual é de cerca de 77.658 km, valor estimado a partir do anuário da NTU (NTU, 2018), Simulador para Avaliação de Viabilidade de Ônibus Elétrico (EPE) e com base em dados operacionais dos municípios de Teresina/PI, Guapimirim/RJ, Rio de Janeiro/RJ, Duque de Caxias/RJ, Magé/RJ, São Gonçalo/RJ, Palmas/TO, Bauru/SP, Hortolândia/SP e

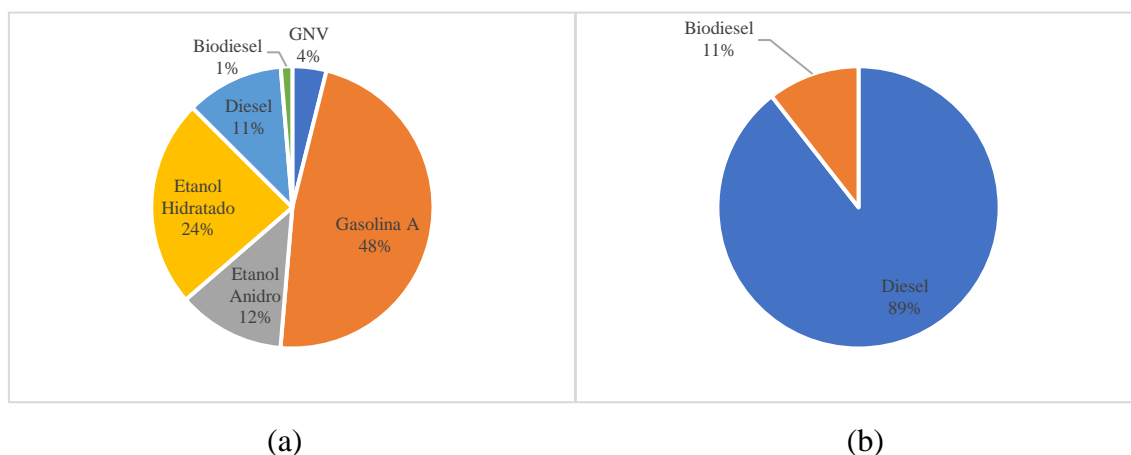
Recife/PE. Por fim, o ajuste da divisão dos ônibus por categoria foi realizado por meio de dados da FABUS (2021), NTU (2018), MINFRA (2021) e ANFAVEA (2021).

A partir de todos os ajustes/atualizações e seguindo as etapas apresentadas na Figura 5.3, foi possível estimar a demanda energética (Figura 6.9 e Figura 6.10), atividade de transporte (mesma participação da apresentada na Figura 6.1) e emissões do modo rodoviário (Figura 6.22).



Fonte: Elaboração própria

Figura 6.9: Demanda energética estimada para o transporte rodoviário (milhões de tep)



Fonte: Elaboração própria

Figura 6.10: Participação relativa de fontes energéticas do transporte de passageiros (a) e carga (b) - 2019

Observa-se que, entre 1990 e 1998, há um aumento expressivo do consumo de óleo diesel pelo transporte de carga de, em média, 4,5% ao ano se comparado ao crescimento mais lento da atividade de transporte de, em média, 3% ao ano. Esse aumento no consumo pode estar relacionado a redução da atividade de transporte do modo ferroviário de carga devido ao sucateamento das ferrovias estatais, sendo a demanda captada pelo transporte rodoviário de carga que, no entanto, apresenta menor capacidade e, portanto, menor eficiência (Costa, 2019).

Além disso, observa-se um descolamento entre a demanda de energia e a atividade de carga no período até 2015, devido ao aumento da participação de comerciais leves, caminhões semileves e leves a diesel na frota circulante (Figura 6.8). Dessa forma, por possuírem menor capacidade, sua intensidade energética é maior.

Esse crescimento se deve à restrição circulação de caminhões de determinados portes no transporte urbano de carga, tais como proibições de estacionamentos, restrições de acessibilidade e limitações das operações de carga e descarga no centro das cidades brasileiras (COSTA, 2019). Assim sendo, os aspectos de peso e dimensões dos veículos são restringidos para minimizar os congestionamentos provocados pelo transporte de cargas em áreas urbanas (ALMEIDA *et al.*, 2017).

Nota-se que o transporte rodoviário de carga demanda exclusivamente óleo diesel que, desde 2005, apresenta biodiesel em sua mistura. Essa exclusividade¹⁴ ocorre também no transporte coletivo por ônibus. No caso dos veículos¹⁵ utilizados no transporte individual

¹⁴ Essa realidade está sendo alterada, dado os recentes licenciamentos de caminhões pesados a GNV, caminhões semileves, caminhões leves, comerciais leves e ônibus elétricos. Por esta razão, o consumo de GNV no transporte de carga e da eletricidade no transporte de passageiros e de carga não foram expostos nesta etapa.

¹⁵ Automóveis, comerciais leves e motocicletas.

motorizado, observa-se que há diversas alternativas de fonte de energia e, portanto, como não apresenta dependência de apenas uma fonte de energia, não deveria ser dada prioridade na proposição de políticas ou incentivos para penetração de novas alternativas.

Destaca-se que, em média, a demanda de diesel representa metade da demanda de energia do modo rodoviário, mas o aumento da mistura de biodiesel no diesel tem reduzido, de forma positiva, essa participação. Além disso, o aumento da participação do transporte individual em função da redução da atividade do transporte público por ônibus, desde meados da década de 1990 (ANTP, 2018, NTU, 2018, GONÇALVES *et al.*, 2019), impactou de forma negativa, nessa redução.

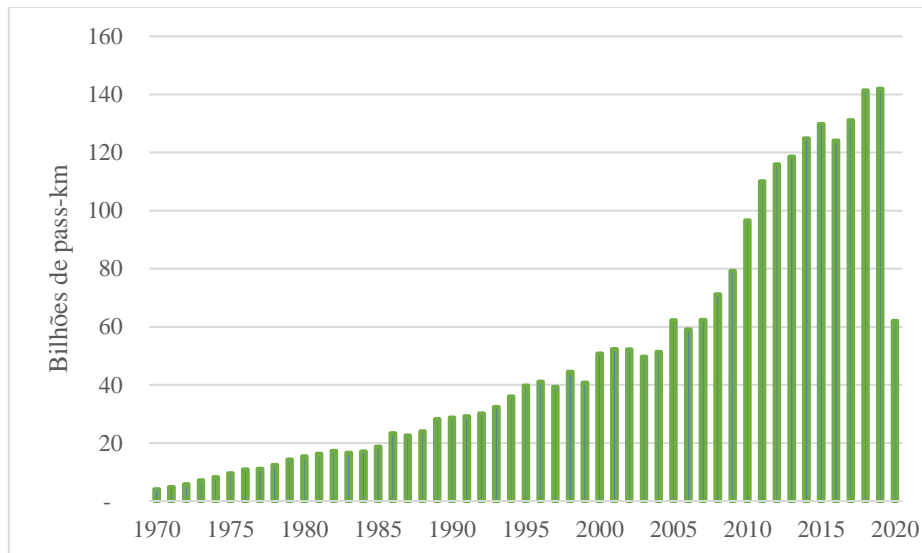
A queda da atividade de transporte público por ônibus, observada por meio de indicadores como o Índice de Passageiros equivalente por Quilômetro (IPKe), foi de cerca de 9% entre 2006 e 2016 (NTU, 2018). Essa queda pode ser justificada pelo aumento da taxa de motorização de 248% entre 2016 e 1990, e entrada de novos atores (por exemplo, *ride-sharing*¹⁶ e *ride-hailing*¹⁷) (GOES, 2020).

Ao contrário do que ocorreu com o transporte público por ônibus, o transporte aéreo, em média, apresentou aumento da sua atividade de transporte nos últimos anos, como pode ser observado na Figura 6.11. No entanto, devido às restrições de circulação e à crise econômica desencadeada pela Covid-19, que impactaram significativamente na atividade de passageiros (-56,3%) e carga (-10,2%).

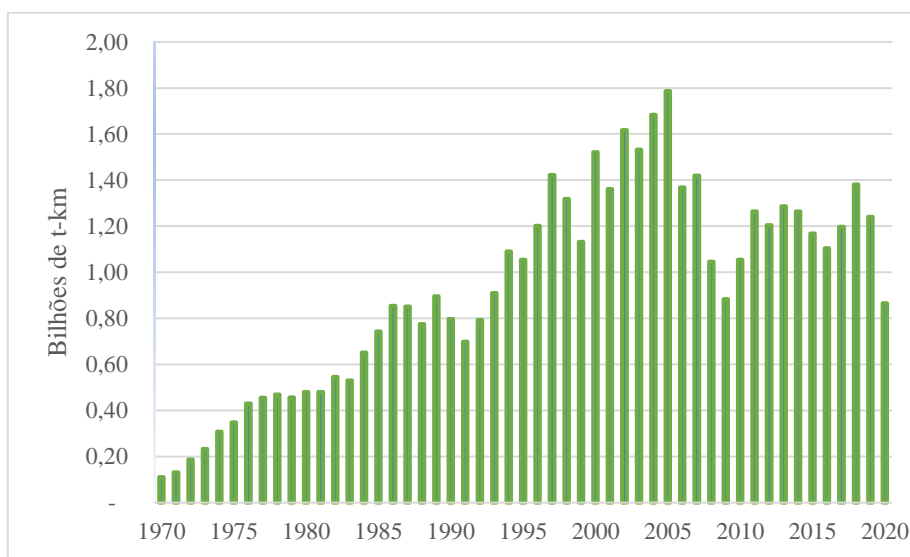
¹⁶ Transporte por aplicativos com o compartilhamento de viagens entre passageiros de diferentes origens.

¹⁷ Transporte por aplicativos sem o compartilhamento de viagens.

Vale ressaltar que dos voos internacionais operados por companhias brasileiras, apenas as etapas dentro do Brasil são consideradas como etapas domésticas (COSTA, 2019), sendo, portanto, consideradas nesta análise.



(a)



(b)

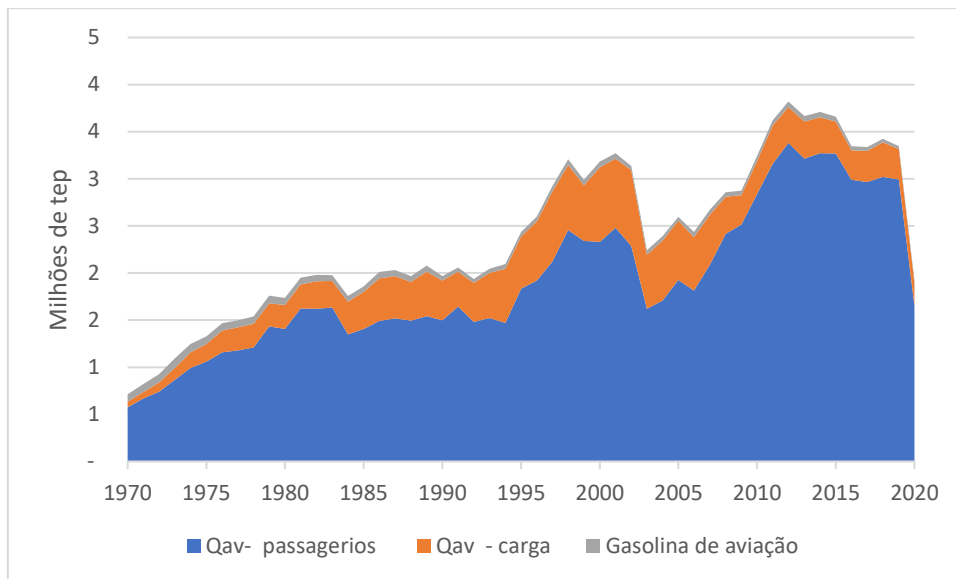
Figura 6.11: Evolução da atividade de transporte do modo aéreo para (a) passageiros e (b) carga

Analisando o horizonte de 1970 a 2019, observa-se um crescimento médio de 7,8% ao ano na atividade de transporte de passageiros, aumentando sua participação da divisão

modal de 3% em 1970, para 4% em 1990, 6% em 2010 e 7% em 2019, sendo o segundo modo mais representativo da atividade de passageiros. Além disso, entre 2010 e 2020, o transporte interestadual de passageiros pelo modo aéreo, em média, transportou o dobro de passageiros se comparado ao transporte rodoviário interestadual por ônibus, variando entre 65,7 e 89,8 milhões de passageiros/ano, desconsiderando 2020, em que houve uma redução de 52% dos passageiros transportados (EPL, 2021a).

Em relação ao transporte aéreo de carga, sua participação na divisão modal é irrisória, cerca de 0,06% em 2019, sendo sua variação histórica alinhada com as variações econômicas nacionais e internacionais. Porém, apesar da baixa participação na divisão modal do transporte de carga, o transporte aéreo possui participação dez vezes maior na produção de transporte em valor do que em peso, sendo essa situação observada apenas nesse modo de transporte (EPL, 2021b). Desta forma, o transporte aéreo de carga é voltado para a necessidade de entrega de uma carga de alto valor em menor tempo, sendo utilizado principalmente no transporte internacional (COSTA, 2019), que está fora do escopo deste estudo.

Para realização do momento de transporte de passageiros e carga apresentados na Figura 6.11, foram demandados bilhões de litros de querosene e milhões de litros de gasolina, dado que este modo de transporte é o mais intenso em energia. A Figura 6.12 apresenta a evolução da demanda por tipo de combustível e atividade ao longo do horizonte de 1970 e 2020.



Fonte: Elaboração própria

Figura 6.12: Consumo energético por tipo de combustível do transporte aéreo

Em relação à distribuição da demanda de combustível por atividade, observa-se que, historicamente, o transporte de passageiros corresponde por aproximadamente 83% do total, ampliando sua participação desde 2007 em decorrência do aumento de usuários, chegando a 90% em 2019. Isso implica no crescimento da oferta de voos e da demanda de passageiros, levando ao aumento significativo do consumo de energia nos últimos anos (CNT, 2015).

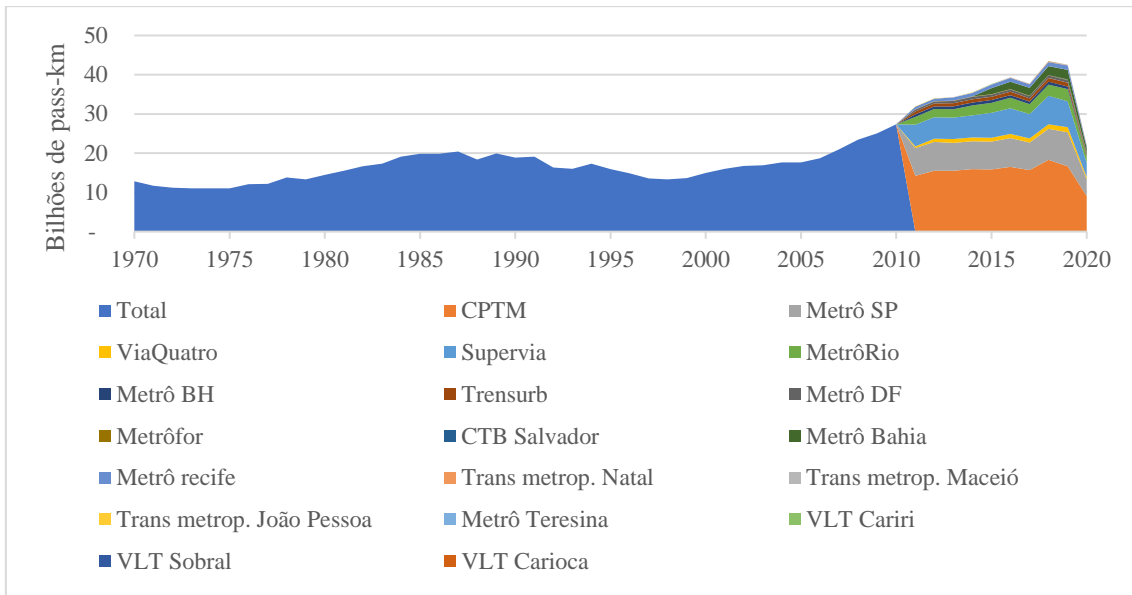
Devido às restrições de circulação e à crise econômica desencadeada pela Covid-19, observa-se que houve queda na demanda no transporte de passageiros (-30%) em 2020, enquanto o transporte de carga apresentou um aumento da demanda (12%). Salienta-se, ainda, que a queda na demanda de passageiros foi superior à da oferta de voos, ou seja, a ocupação média das aeronaves foi menor que a média, impactando diretamente na intensidade energética que aumentou cerca de 27%, versus 9% do transporte de carga. Assim, a queda na demanda energética difere da queda na atividade (-29% versus -56%, no caso do transporte de passageiros).

O consumo de gasolina de aviação, em média, corresponde a apenas 2% da energia demandada pelo modo aéreo. Esta fonte energética é utilizada em aviões de pequeno porte, modelos utilizados para pulverização de lavouras e no transporte especial de passageiros, que não possuem capacidade de transportar uma quantidade relevante de carga (Gonçalves *et al.*, 2019b).

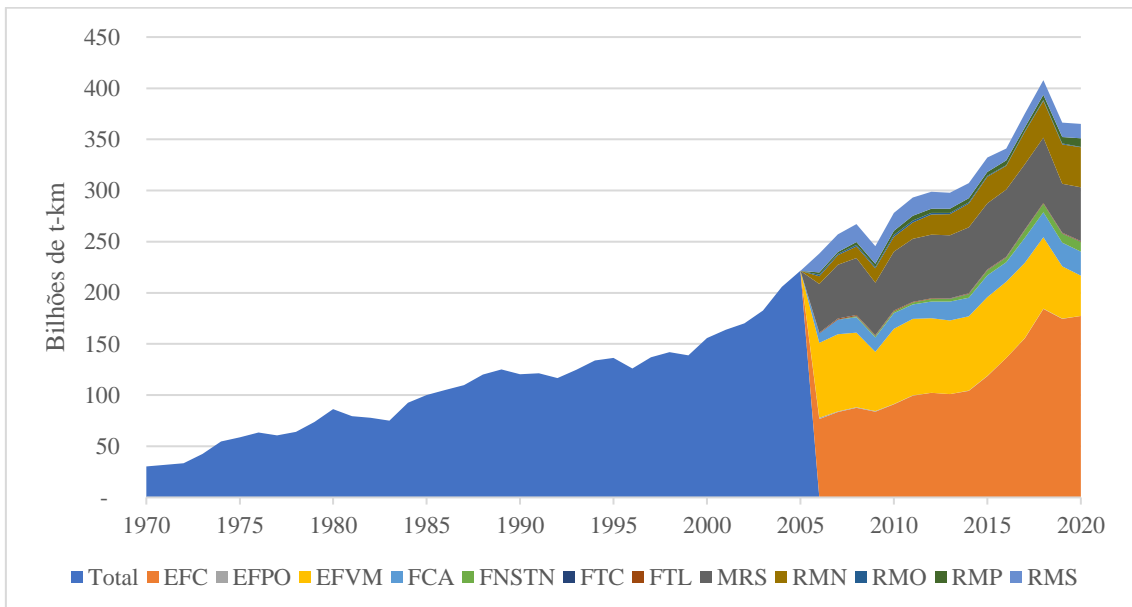
O modo ferroviário é terceiro mais representativo na matriz de passageiros (considerando apenas o transporte motorizado) e segundo na de carga. Por meio das etapas apresentadas na Figura 5.2, foi possível estimar a evolução do momento de transporte de ambos os casos para todo o histórico.

Nas estimativas do transporte ferroviário de passageiros, considerou-se todas as linhas de metrô, trens urbanos/metropolitanos e VLT em operação no Brasil, o mesmo ocorreu no transporte de carga, considerando a atividade de todas as ferrovias em operação no país ao longo dos anos.

Devido à falta de dados consistentes, só foi possível aplicar a abordagem apresentada na Figura 5.4 para o período de 2010 a 2020, no caso de passageiros, e de 2006 a 2020 no caso de carga. Isto posto, para os demais anos, foram consideradas as etapas apontadas na Figura 5.2. A Figura 6.13 apresenta a evolução da atividade de transporte por tipo de atividade.



(a)



(b)

Legenda: EFC - Estrada de Ferro Carajás - VALE S.A.; EFVM - Estrada de Ferro Vitória a Minas - VALE S.A.; FCA - Ferrovia Centro Atlântica S.A.; FNS - Ferrovia Norte Sul - VALEC S.A.; EFPO - Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A.; FTC - Ferrovia Tereza Cristina S.A.; FTL S/A – Ferrovia Transnordestina Logística S.A.; MRS Logística S.A.

Fonte: Elaboração própria

Figura 6.13: Evolução da atividade de transporte do modo ferroviário para (a) passageiros e (b) carga

O crescimento médio do transporte ferroviário de passageiros na década de 70 foi de 1% a.a., passando para 3% a.a. na década de 80, tendo uma redução de 2% a.a. na década de 90 e aumentando aproximadamente 6% a.a. no período de 2000-2018, seguido de uma queda de 2% em 2019 e 48% em 2020, sendo que a Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CTPM), Metrô SP e Supervia Trens Urbanos, representam aproximadamente por 80% da atividade do setor.

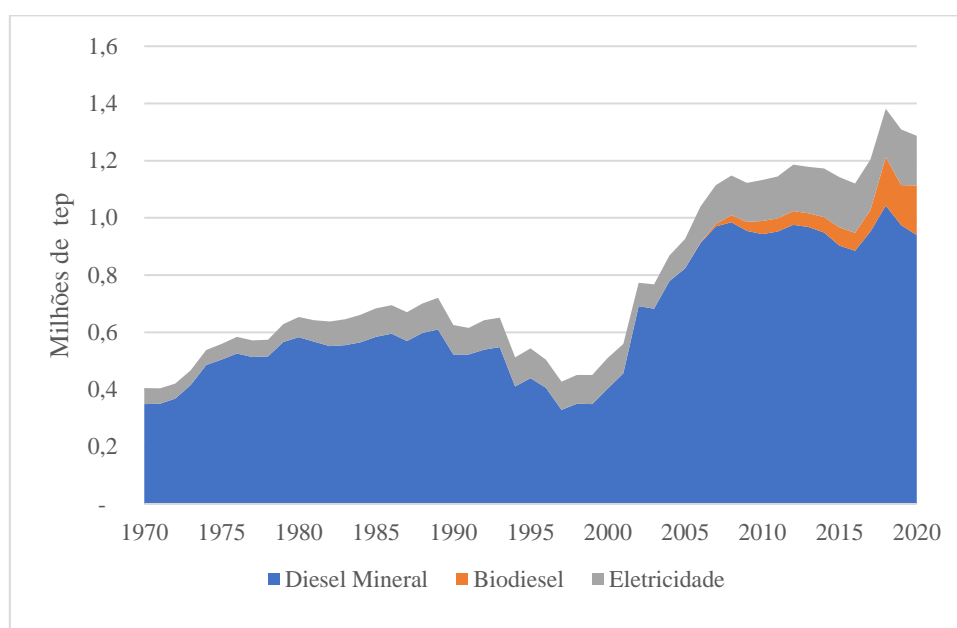
Em relação ao transporte ferroviário de carga, observa-se um crescimento majoritariamente constante de cerca de 1.248% entre 1970 e 2018, apresentando apenas uma queda significativa de 8%, ocorrida em 2009 (reflexos da crise financeira de 2008). A atividade de 2019 e 2020 foi inferior à de 2017 e 2018, devido ao rompimento da barragem em Brumadinho-MG e por problemas com outras barragens do país.

Embora existam 12 ferrovias em operação, as ferrovias EFC (Estrada de Ferro Carajás), EFVM (Estrada de Ferro Vitória a Minas) e MRS Logística representam, a partir de 2006, 80% da atividade do setor. Nesse contexto, o minério de ferro figura como o principal produto transportado no modo, representando, em média, 75% dos produtos transportados (ANTP, 2021). Portanto, os problemas estruturais com barragens no país afetam e podem afetar, principalmente, na atividade do modo ferroviário e do dutoviário.

Ao contrário do transporte ferroviário de passageiros, o transporte ferroviário de carga não teve sua atividade reduzida significativamente devido a pandemia, sendo a variação em relação a 2019 de apenas 0,4%.

Quanto a evolução da demanda energética pelo modo ferroviário (Figura 6.14), observa-se que embora esse modo seja representativo na matriz de carga (26% em média) e tenha uma participação de apenas 2% em passageiros, sua demanda energética foi de cerca de

1,4 milhões de tep em 2018, devido à baixa intensidade energética desse modo, sendo o mais eficiente no Brasil tanto no transporte de passageiros, quanto no de carga.



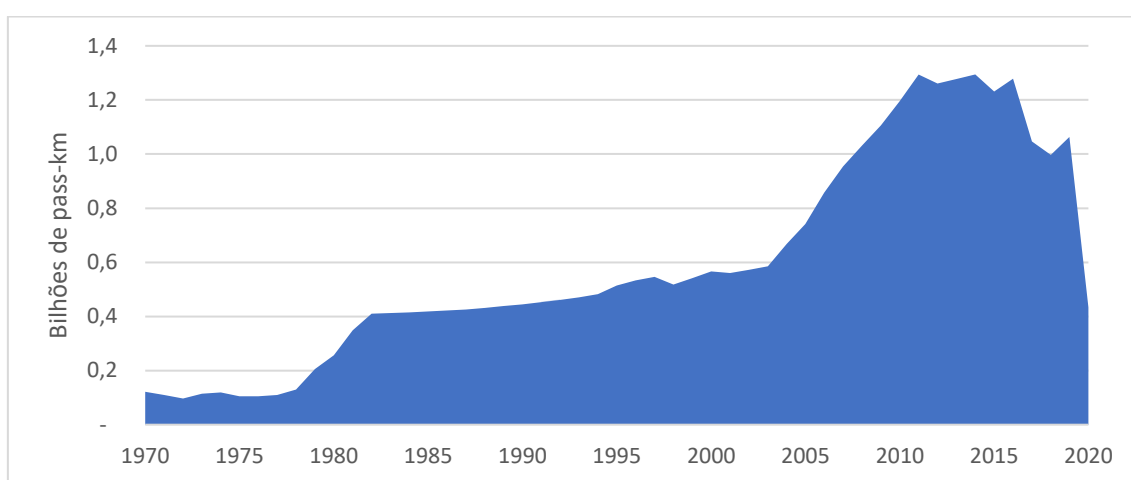
Fonte: Elaboração própria

Figura 6.14: Consumo energético por tipo de energia do transporte ferroviário

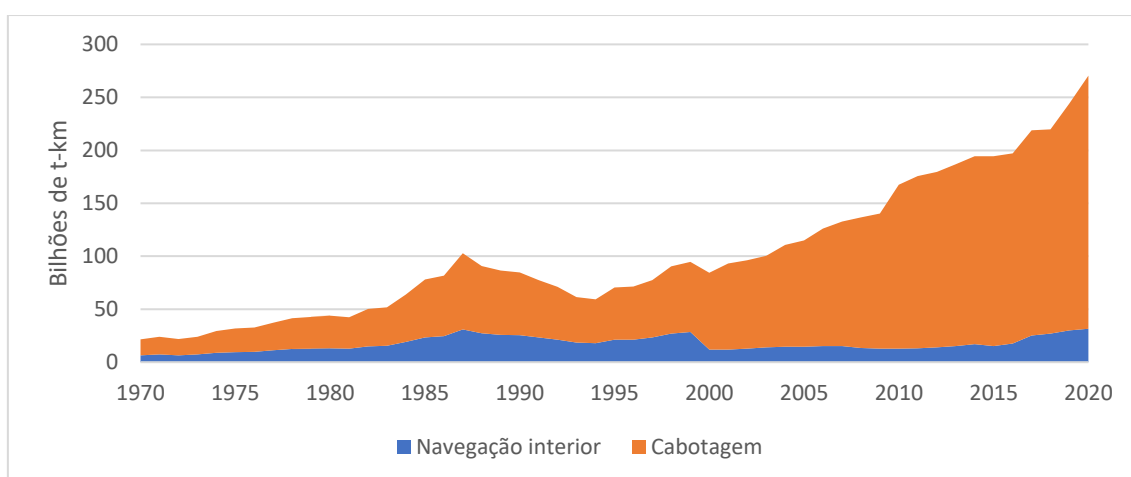
Considera-se o consumo de eletricidade para o transporte de passageiros e o consumo de diesel e biodiesel (mistura obrigatória) para o transporte de carga. Isto posto, a participação do transporte de passageiros na demanda de energia oscilou entre 10% e 23%, sendo em média de 14%, o que contribui para a participação de energia renovável no total da energia demandada pelo modo ferroviário. Inicialmente essa participação era de 16,4% (GONÇALVES *et al.*, 2019b), aumentando para 27,3% em 2020, conforme o aumento da malha, da demanda no transporte de passageiros e do percentual da mistura de biodiesel.

Em relação ao transporte aquático, que é pouco representativo na matriz de passageiros, de apenas 0,02% em 2019, e relativamente representativo no transporte de carga, 17,2%

em 2019, há dificuldade na alocação de forma precisa do consumo energético tanto para o transporte aquático de passageiro quanto de carga. Essa dificuldade inclui também a falta de dados referentes ao rendimento energético médio por tipo de embarcação (dado a característica única do desenho dos motores dos modelos de embarcação) (Gonçalves *et al.*, 2019b). Dessa forma, há uma maior incerteza nos dados estimados, em comparação com os outros modos de transporte apresentados anteriormente. A Figura 6.15 apresenta a evolução do momento de transporte por tipo de atividade.



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria

Figura 6.15: Evolução da atividade de transporte do modo aquático

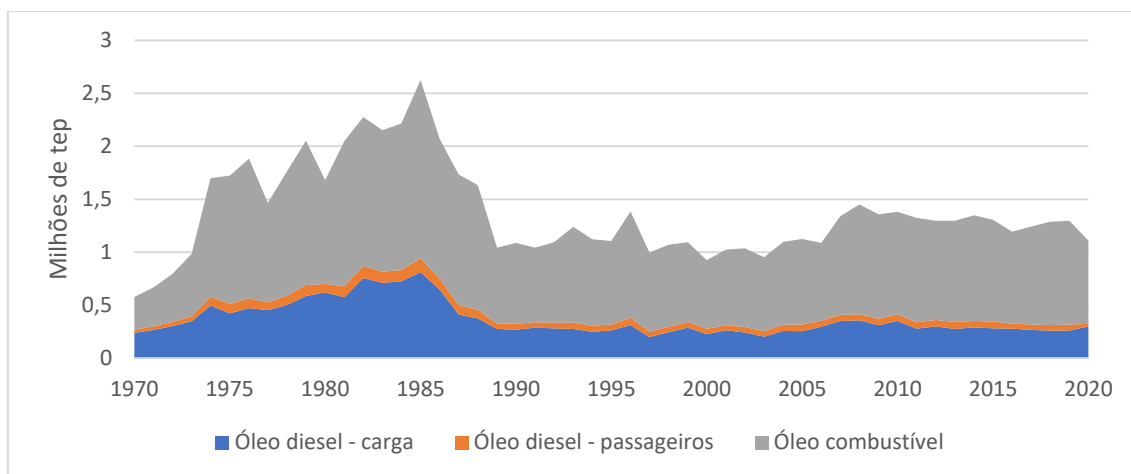
Pode ser observado um aumento da atividade de transporte de passageiros, sobretudo a partir de 2004. O crescimento até o ano de 2003 foi de aproximadamente de 2% a.a., passando para um crescimento anual entre 10% e 13% a.a. até 2007 (GONÇALVES *et al.*, 2019b). Ressalta-se que esta atividade contempla operações concedidas (transporte urbano) e o transporte da região amazônica, dos quais os dados foram obtidos com operadores e com estudos específicos das regiões.

Diferente do comportamento da linha de base do transporte de passageiros, a linha de base do transporte de carga por navegação interior oscila consideravelmente, principalmente entre os anos de 1999 e 2000. Por outro lado, o transporte de carga por cabotagem tem crescido desde 1998, atingindo 16% na divisão modal, enquanto a participação da navegação interior tem oscilado, estabilizando em cerca de 2% de participação entre 2017 e 2020.

Em relação ao perfil de carga da cabotagem, cerca de 75,4% do volume transportado em 2020 foi de petróleo e derivados, seguido de contêineres (8,1%), bauxita (7,1%) e minério de ferro (4%) (EPL, 2021a). Já na navegação interior, assim como no modo ferroviário, o minério de ferro é o principal produto transportado, representando historicamente mais da metade das cargas transportadas, seguido da soja, que tem aumentado sua participação desde 2016, tendo quase triplicado sua participação nos últimos quatro anos. Como esperado, esse comportamento também ocorre com o milho (ANTAQ, 2021).

Em relação ao impacto devido às restrições de circulação e à crise econômica desencadeada pela Covid-19, observa-se que houve um impacto de aproximadamente 60% da atividade de passageiros, o que não ocorreu no transporte de carga, que teve um aumento na atividade em torno de 11%, devido principalmente ao aumento da movimentação por soja, milho, petróleo e derivados.

O consumo energético total do transporte aquático, ou seja, a soma do consumo energético de passageiro (urbano concedido e região amazônica) e de carga (cabotagem e navegação interior) é ilustrado na Figura 6.16.



Fonte: Elaboração própria

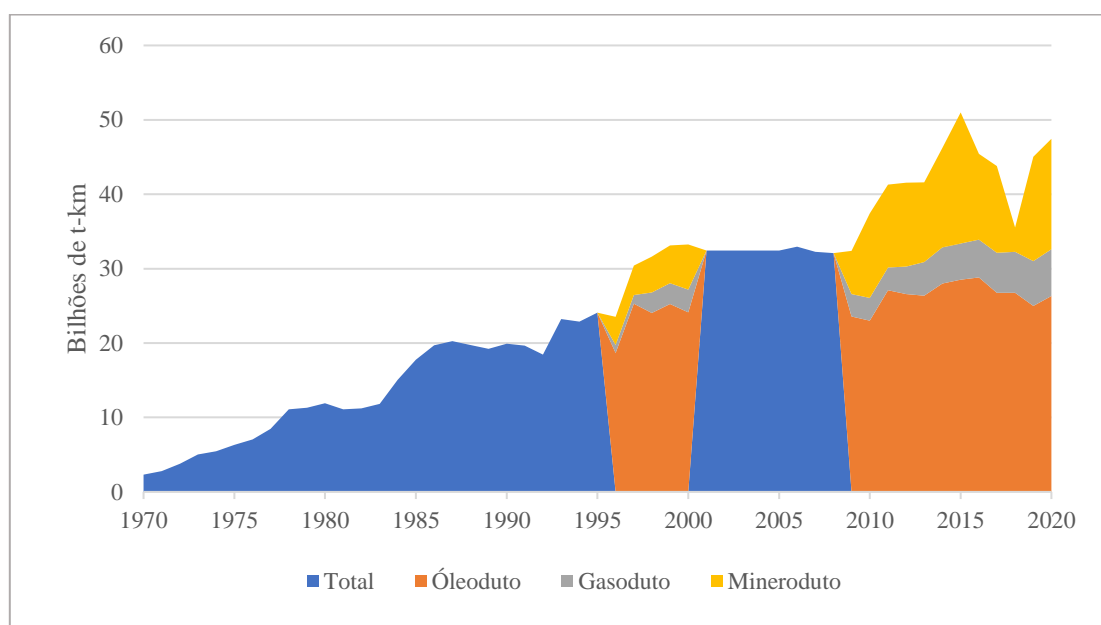
Figura 6.16: Consumo energético estimado do transporte aquático

Destaca-se que, ao contrário dos modos ferroviário e rodoviário, não há mistura de biodiesel no óleo diesel mineral utilizado no modo aquático. Quanto a evolução a participação de combustíveis nesse modo, observa-se que historicamente cerca de mais de dois terços é por óleo combustível. Ainda, a demanda energética de passageiros representa apenas 5% do total demandado pelo modo.

Para completar a matriz de passageiros, a Figura 6.1 apresenta a evolução da atividade do transporte ativo. Porém, apenas para o horizonte de 2006 a 2020, devido à falta de dados de atividade, dado que essa estimativa deve ser realizada com base em resultados de pesquisas origem-destino em nível municipal, pois é necessária uma amostra estratificada e representativa da população do município para identificar o número de pedestres e ciclistas, bem como a frequência e a extensão média das viagens. Além disso, não é possível confrontar a atividade obtida com a sua respectiva demanda de energia, o que

impossibilita novas formas de estimativas e validações. Destaca-se que, 97% dos deslocamentos são a pé e cerca de 3% por bicicleta (ANTP, 2018).

Por outro lado, para completar a matriz de carga, a Figura 6.17 apresenta a evolução da atividade do transporte dutoviário. No entanto, devido à falta de dados consistentes, só foi possível aplicar a abordagem apresentada na Figura 5.4, para o período de 1996 a 2000 e de 2009 a 2020. Isto posto, para os demais anos, foram consideradas as etapas apontadas na Figura 5.2.



Fonte: Elaboração própria

Figura 6.17: Evolução da atividade de transporte do modo dutoviário

A atividade do modo dutoviário cresceu a uma taxa de 18% a.a. na década de 70 e 6% na de 80 e 90. Sua atividade se estabilizou entre 2001 e 2010, seguido de um aumento expressivo de aproximadamente 11% a.a. entre 2010 e 2015. Porém, devido ao desastre de Mariana ocorrido no final de 2015, o duto da mina do município foi desativado, impactando na queda na atividade dos minerodutos em 35%.

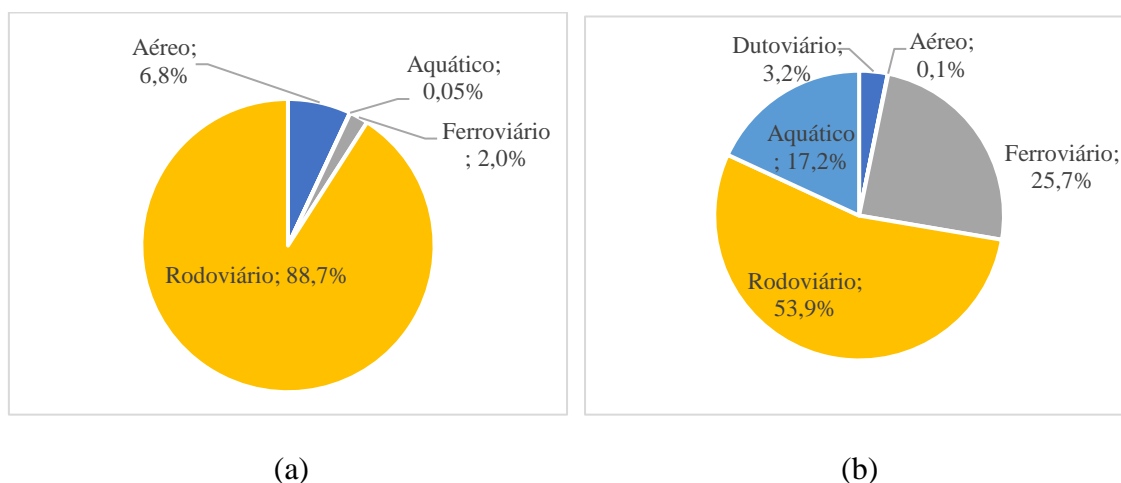
Historicamente a atividade dos oleodutos representaram por mais da metade da atividade do modo dutoviário, porém, sua atividade, assim como a dos gasodutos, possui menos variações ao longo do tempo se comparado a dos minerodutos.

6.2 Planejamento dos cenários

Esta fase busca realizar o planejamento dos cenários que serão desenvolvidos, para isso é realizado um breve diagnóstico do setor, consolidando os resultados e levantando programas e marcos que o impactaram. A partir disso são pré-selecionadas premissas e medidas de mitigação que serão debatidas com *stakeholders*.

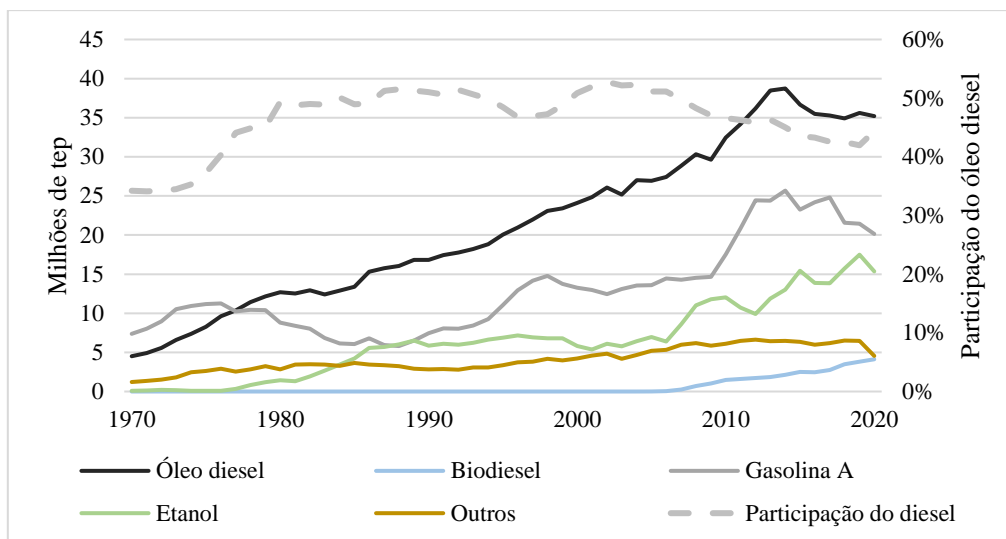
6.2.1 Diagnóstico do setor

A partir das estimativas realizadas e apresentadas no subcapítulo anterior, a Figura 6.18 apresenta a divisão modal de passageiros e de carga para o ano de 2019, dado que o ano de 2020 foi atípico devido às restrições de circulação para combate a pandemia de Covid-19. A Figura 6.19 apresenta a evolução da demanda energética por tipo de energia.



Fonte: Elaboração própria

Figura 6.18: Divisão modal de (a) passageiros e (b) carga em 2019.



Fonte: Elaboração própria

Figura 6.19: Consumo de energia do setor de transporte brasileiro.

O modo rodoviário tem sido historicamente mais representativo em ambas as matrizes, sendo utilizado, inclusive, para o transporte de passageiros e cargas a distâncias consideradas continentais devido ao tamanho do território nacional. Segundo CNT (2018), os investimentos maciços na indústria automobilística a partir da década de 1950, em contraste com a falta de incentivos para modos de transporte de alta capacidade, podem explicar a situação atual.

Analisando a Figura 6.19, observa-se o crescimento majoritariamente contínuo da demanda energética do setor, apresentando um crescimento anual médio de 4% a.a. entre 1970 e 2014. Porém, devido a recessão econômica, houve retração da demanda energética entre os anos de 2015 e 2018, com um acréscimo de 3,2% em 2019 e uma queda de cerca de 6% em 2020 devido às restrições de circulação para combate a pandemia de Covid-19, sendo essa queda relacionada ao transporte de passageiros, dado que não houve redução da demanda, significativa, no transporte de carga.

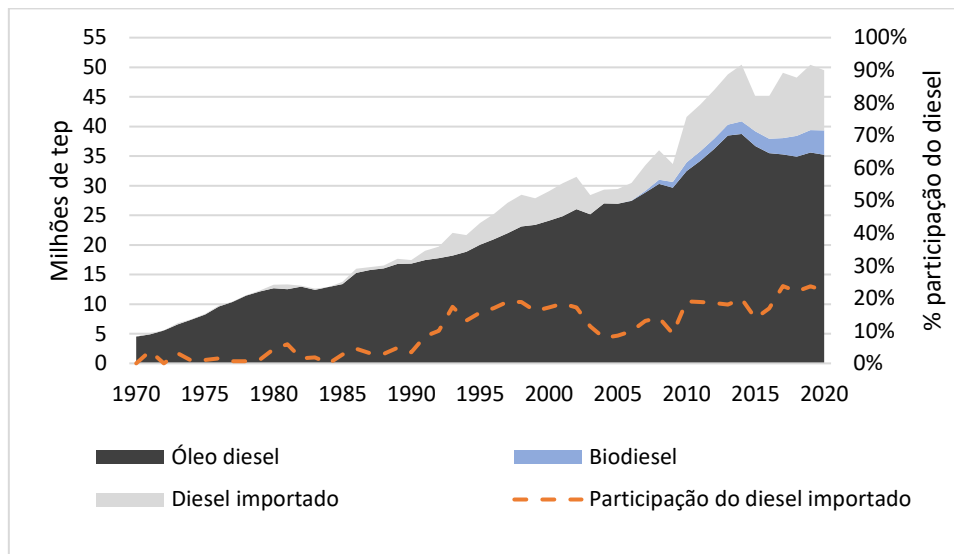
Destaca-se também que, desde 1980, a participação do diesel na demanda total de energia por transporte tem oscilado entre 34% e 53% (EPE, 2021). Isso se deve ao fato de que todos os ônibus possuem dependência ao uso do diesel, além dos caminhões, trens de carga e embarcações de apoio *offshore* e da navegação interior. Adiciona-se ainda que, ao contrário da gasolina, que tem etanol hidratado e GNV como alternativa para sua substituição, o diesel mineral ainda não possui um combustível substituto imediato.

De forma a minimizar essa dependência ao diesel, desde 2005 há mistura regulamentada de biodiesel no óleo diesel, tendo como perspectiva o aumento dessa mistura em volume até alcançar 15% (B15) para 2023 (MME, 2019). No entanto, essa meta pode não ser alcançada, dado que houve redução da mistura de 13% para 10% em 2021. Porém, apesar da chegada da nova fase do Programa de Controle da Poluição Atmosférica por Veículos Automotores (Proconve - P8), equivalente ao Euro 6, devem ser analisadas o percentual das misturas de biodiesel, pois estudos europeus apontam que os motores atuais não estão preparados para receber misturas com conteúdo de éster acima de 7% (EPE, 2020).

Além disso, o aumento do percentual de mistura de biodiesel desde 2005, como mecanismo para melhorar a segurança energética, não foi suficiente para reduzir a demanda por óleo diesel. Isso é pode ser considerado sinal de alerta, dado o histórico de greves de caminhoneiros no Brasil, que podem impactar o transporte de carga, como ocorrido em 2018, e desencadear a escassez de alimentos, suprimentos médicos e combustíveis (Dantas *et al.*, 2019).

Nesse sentido, a Figura 6.20 apresenta a flutuação das demandas de óleo diesel e biodiesel, bem como a participação do óleo diesel importado. Observa-se que, desde a recessão econômica de 2015, houve maior dependência do consumo de óleo diesel provenientes de importações. Esse também é o caso do querosene de aviação, cuja oferta

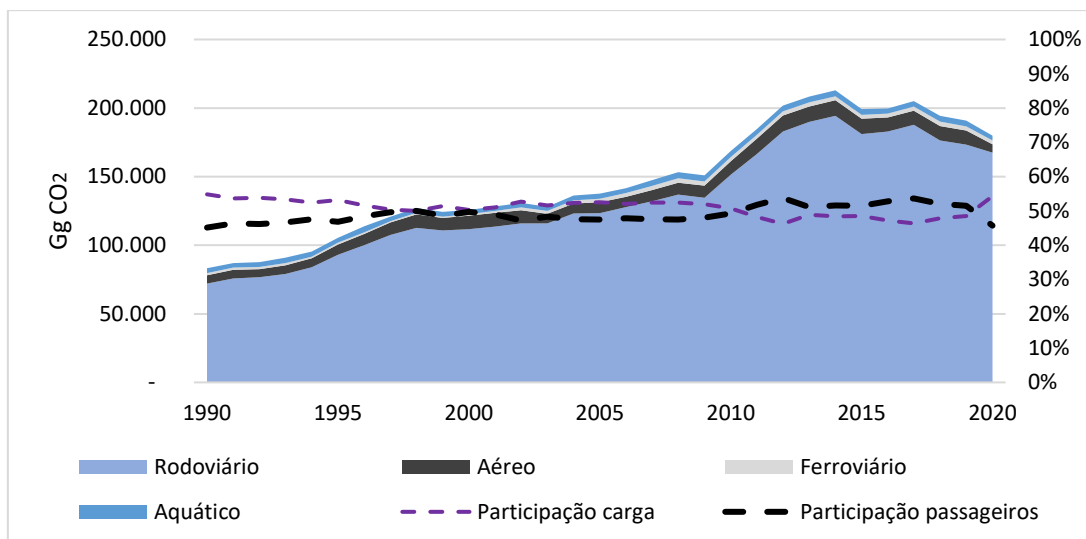
tende a ser insuficiente para atender ao crescimento da demanda e, portanto, espera-se que as importações representem 30% do volume total até 2031 (EPE, 2022).



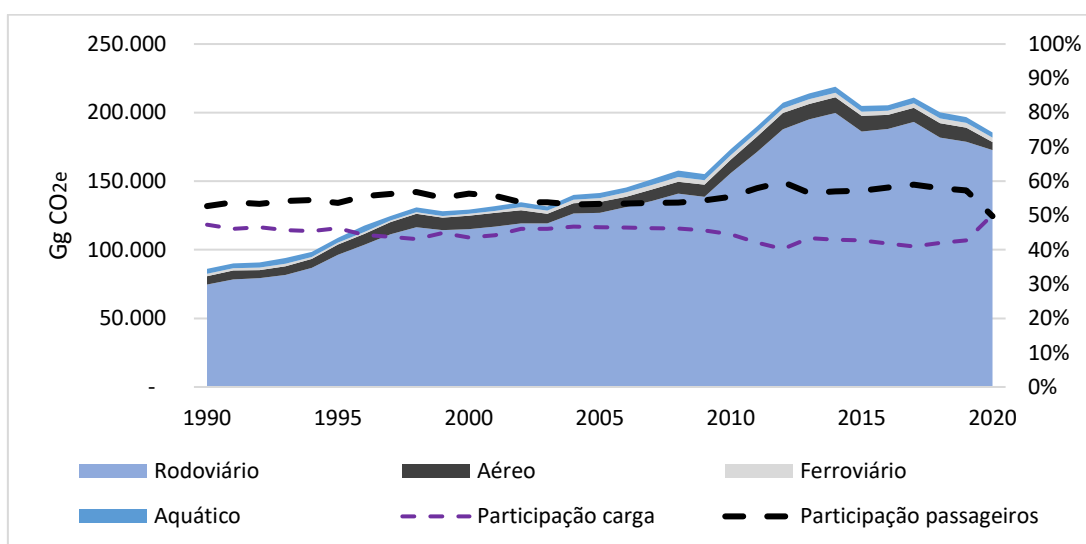
Fonte: Elaboração própria

Figura 6.20: Evolução do consumo de energético diesel e biodiesel no Brasil

Após as análises do momento de transporte por tipo de atividade e modo de transporte e de sua respectiva demanda energética, estima-se as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O. Ainda, por meio de seus respectivos GWP, considerando o AR5 (Allen *et al.*, 2014), transformam-se os gases não CO₂ em CO₂e. A Figura 6.21.a apresenta a evolução das emissões de CO₂, enquanto a Figura 6.21.b apresenta a evolução das emissões de CO₂e. O ano base dos resultados (1990) segue a da Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (MCTI, 2020).



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria

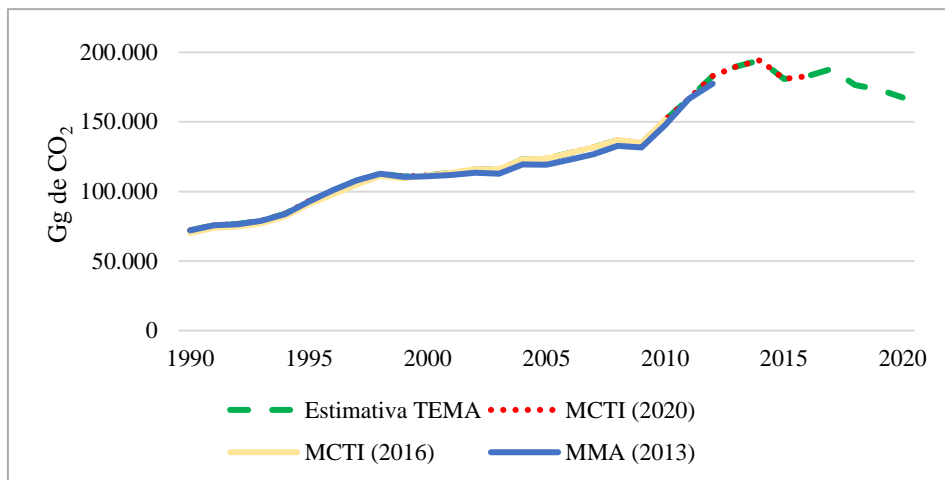
Figura 6.21: Evolução das emissões do setor de transportes.

Observa-se que o acréscimo de CO_2 para CO_{2e} é de, em média, 3%. Devido a essa pequena diferença, muitos autores optam por estimar apenas CO_2 , como foi discutido no Capítulo 3 (Tabela 3.2). Porém, essa diferença é capaz de esclarecer que a atividade de passageiros, historicamente, é mais representativa em termos de emissões se comparado ao transporte de cargas. No entanto, em 2020, devido às restrições de circulação para combate a

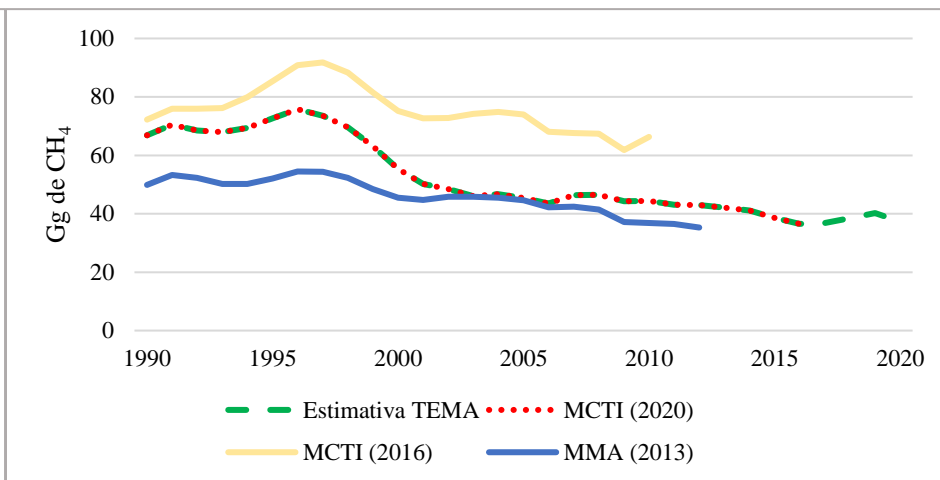
pandemia de Covid-19 que levou a redução dos deslocamentos de passageiros, o transporte de carga foi o mais representativo.

Como se esperava, o modo rodoviário é o mais representativo nas emissões do setor, participação que tem aumentado ao longo do histórico, passando de 87% em 1990, para 90% em 2000 e 93% em 2020. Essa participação era esperada pelo fato de ser o modo mais representativo tanto na matriz de passageiros quanto na de carga, além de ser o segundo modo mais intenso em energia. Isso pode explicar os diversos estudos que trabalham apenas com esse modo de transporte, como foi observado no Capítulo 3 (Tabela 3.2). No entanto, recomenda-se que todos os modos sejam considerados, uma vez que eles sofrem interferências mútuas ao longo do tempo.

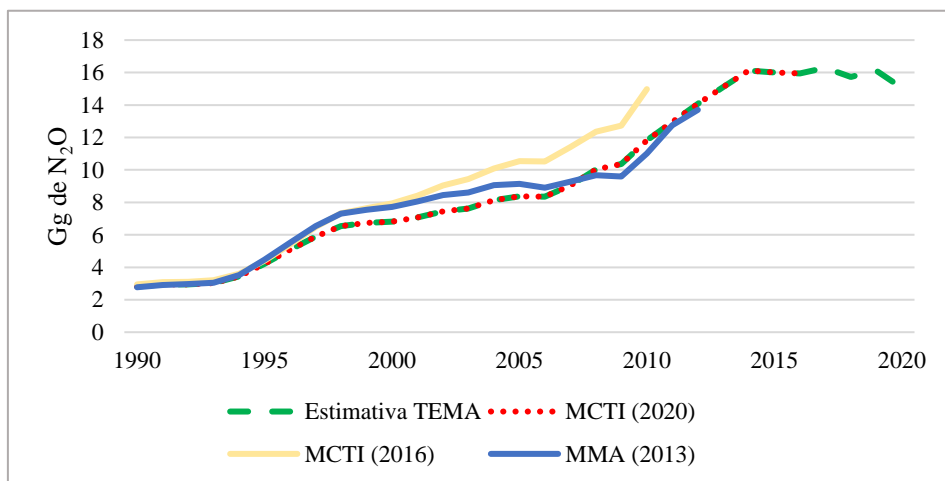
Como forma de validar os resultados, optou-se por comparar as estimativas de emissões do modo rodoviário, que representa 93% das emissões em 2020, com outros estudos de referência como o inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários (MMA, 2013) e com a Terceira e Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (MCTI, 2016 e 2020). A Figura 6.22 apresenta a comparação dos resultados.



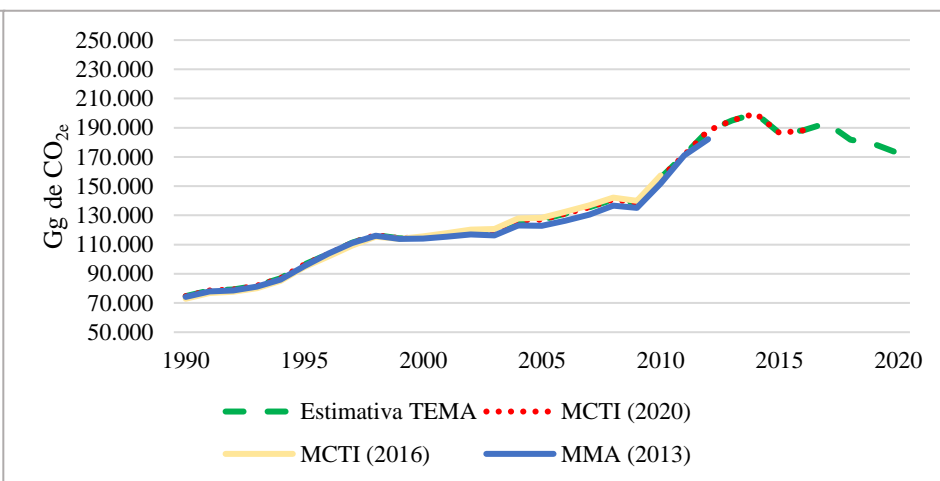
(a)



(b)



(c)

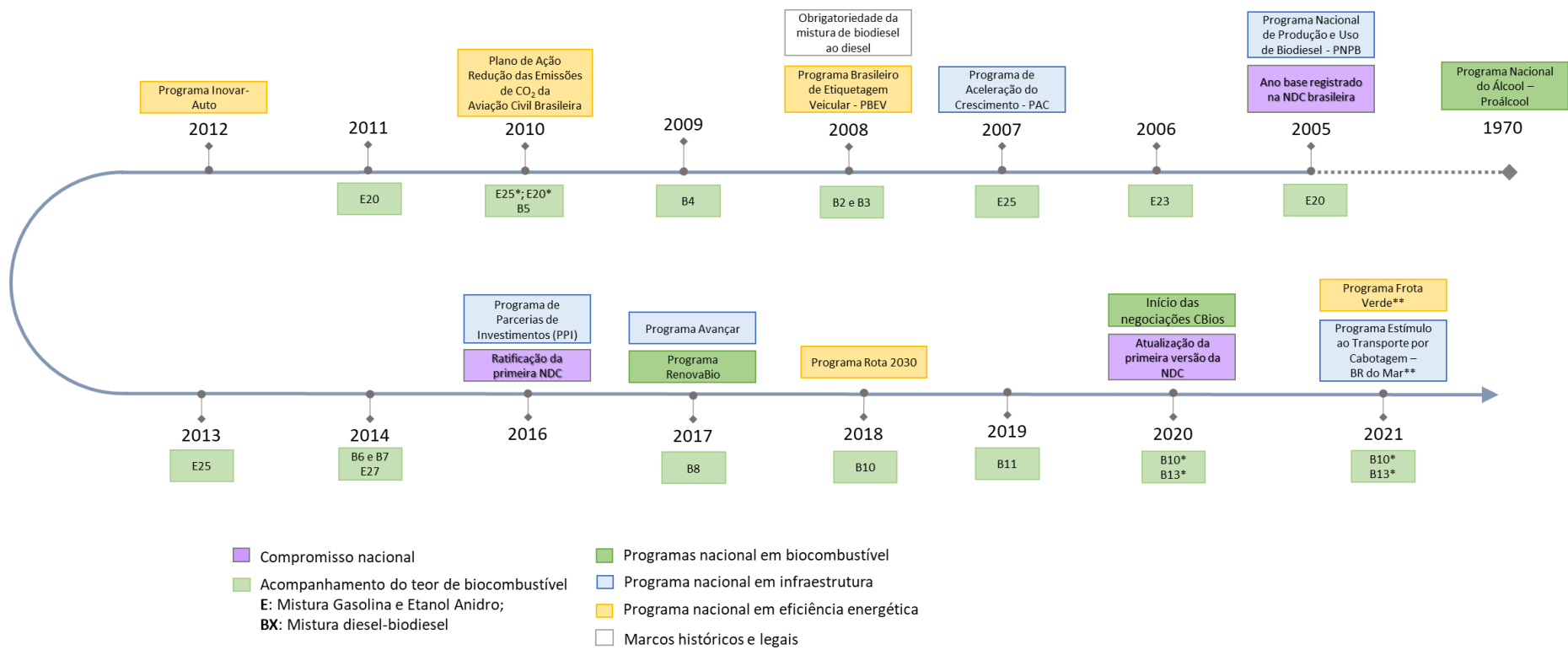


(d)

Fonte: Elaboração própria a partir de MMA (2013) e MCTI (2016 e 2020)
 Figura 6.22: Comparação dos resultados com estudos de referência.

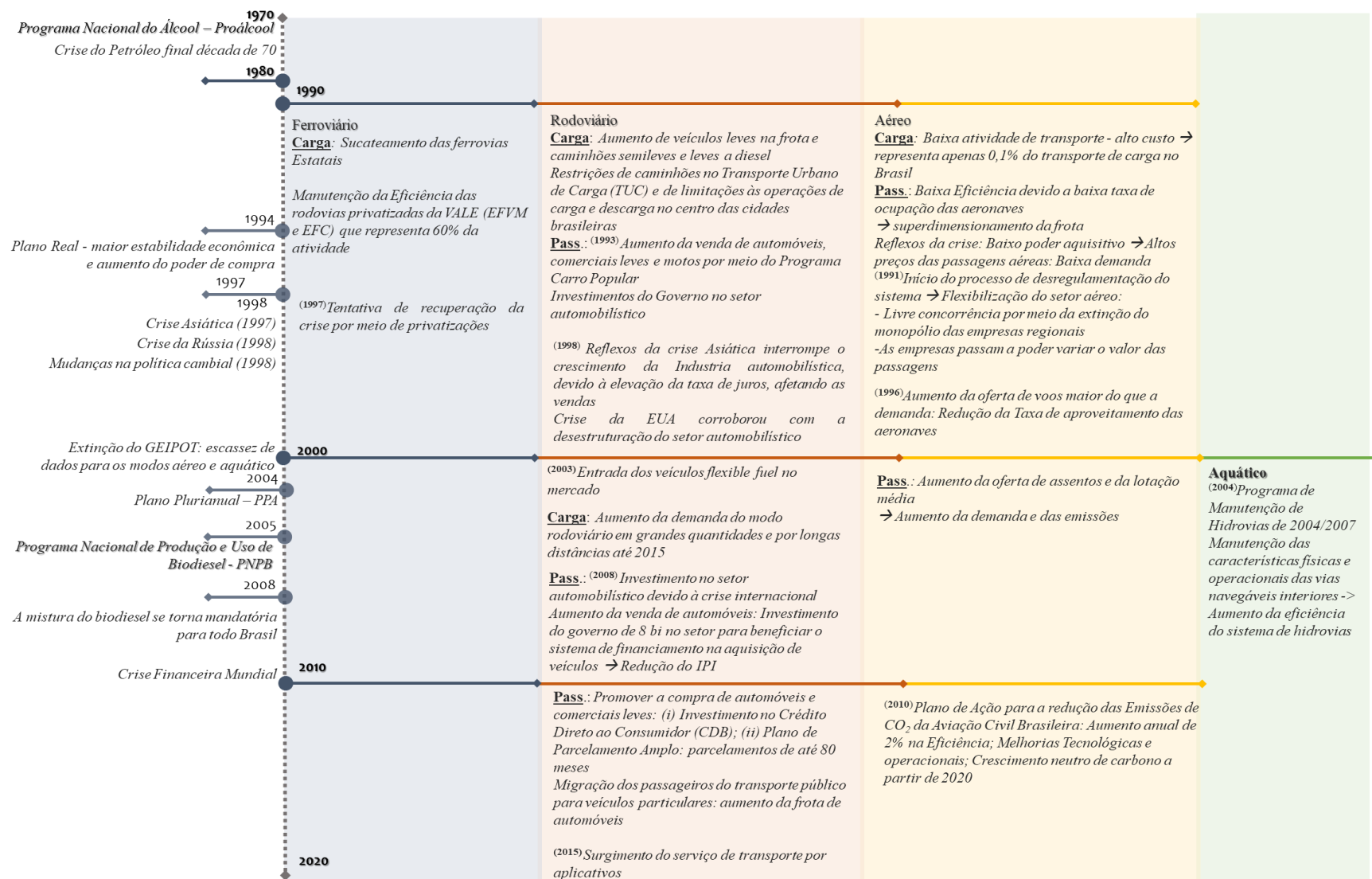
Observa-se que os estudos apresentam o resultado muito próximo para as estimativas de CO₂, dado que é estimado a partir dos resultados de energia usando fatores *Tier 2*. No entanto, isso não ocorre no caso dos gases não-CO₂, que são estimados considerando fatores de emissão locais e específicos da tecnologia e fonte energética (*Tier 3*), ou seja, quanto mais desagregado for o modelo, mais precisos serão os resultados.

Para ampliar a análise e auxiliar na definição das premissas locais que melhor representem as políticas governamentais, iniciativas privadas e demandas da sociedade até 2050, foram levantados e analisados, por meio de uma revisão documental, os principais programas e marcos históricos que impactaram o setor de transportes brasileiro. A Figura 6.23 sintetiza os principais programas e seus avanços. Ainda, a Figura 6.24 condensa os principais marcos históricos que impactaram o setor.



Fonte: Elaboração própria a partir de Goes *et al.* (2022)

Figura 6.23: Síntese dos principais marcos históricos que impactaram o setor de transportes



Fonte: Elaboração própria a partir de ANAC (1998, 1999, 2012, 2013 e 2015), ANTT (2016), Bartholomeu e Filho (2008), BNDES (2008), CNT (2015 e 2017), Costa (2019), DNIT (2015), Goldenstein (1998), IPEA (2010).

Figura 6.24: Síntese de marcos históricos que impactaram o setor de transportes

Os programas e marcos históricos possibilitaram o atendimento, no que tange o setor de transportes, da NAMA brasileira que, embora não detalhe metas quantitativas para o setor, destaca os objetivos que podem ser aplicados a transportes, são eles: (i) reduzir o consumo de combustíveis fósseis e de eletricidade, aumentando a eficiência energética em diferentes setores da economia; e (ii) aumentar a oferta de biodiesel, etanol anidro e hidratado. Segundo estudo de La Rovere *et al.* (2019), as metas estabelecidas foram alcançadas, pois o aumento da eficiência energética e a oferta e uso de biocombustíveis resultaram na redução de até 93 MtCO_{2e}¹⁸.

A NDC brasileira, assim como a NAMA, não especifica metas quantitativas para o setor, isto é, não estabelece metas secundárias precisas para atingir a meta absoluta de mitigação de carbono. No entanto, as metas da NDC que podem ser aplicadas a transportes são: (i) o aumento a participação de bioenergia sustentável na matriz energética brasileira para aproximadamente 18% até 2030, expandindo o consumo de biocombustíveis, aumentando a oferta de etanol, inclusive por meio do aumento da parcela de biocombustíveis avançados (segunda geração), e aumentando a parcela de biodiesel na mistura do diesel; e (ii) a adoção de medidas de eficiência, melhorias na infraestrutura de transportes e no transporte público em áreas urbanas.

Quanto aos biocombustíveis, o programa RenovaBio (Figura 6.23), desenvolvido para atender às metas da NDC, busca certificar os produtores por meio da obtenção de créditos de descarbonização (CBIOs) a serem adquiridos pelas distribuidoras de combustíveis (parte obrigada) e outros agentes (parte não-obrigada), considerando cotas anuais obrigatórias ou negociadas no mercado. Como resultado, o consumo de biocombustíveis

¹⁸ Considerando os dados observados no horizonte 2010-2018 e dados estimados para 2019 e 2020.

vem aumentando no Brasil, seja pelo aumento da mistura regulada de biodiesel ou pelo fornecimento de etanol hidratado (Goes *et al.*, 2020).

No entanto, atualmente, discute-se a fungibilidade e adicionalidade do programa e o mercado global de carbono dada aprovação do artigo 6º da COP 26, que trata do mercado internacional. Ainda, em relação as articulações internas quanto ao mercado de carbono, tem-se a PL 528, que busca estabelecer o mercado de carbono. Nesse sentido há possibilidade de integrar o RenovaBio nesse mercado, dado que atualmente há incidência de tributação significativa no CBIOS. Por fim, há uma preocupação com os recentes subsídios à gasolina c e ao óleo diesel, pois a tributação também é uma política pública e isso deve ser um ponto de atenção, pois tende a deixar os biocombustíveis menos atrativos.

A eficiência energética tem aumentado com o efeito de programas nacionais como o Rota 2030¹⁹, baseado em incentivos fiscais para pesquisa e desenvolvimento, e o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV), para referenciar e melhorar a competitividade no setor.

Por fim, o Brasil avançou em instrumentos para ampliar a infraestrutura de modos de transporte de alta capacidade. Entre 2010 e 2020, foram lançados os Programa Parcerias de Investimento - PPI (2016) e o Programa Avançar (2017), substituindo o Programa de Aceleração do Crescimento - PAC (2007). Esses programas foram criados para promover

¹⁹ Já se discute sua continuidade com o Rota 2050

e facilitar investimentos em projetos estratégicos de infraestrutura, inclusive de transporte, por meio de investimentos públicos ou parcerias público-privadas.

No entanto, como destacado na seção de diagnóstico do setor, nenhuma medida efetiva tem sido adotada com impacto significativo para a melhora do transporte público em áreas urbanas, que está continuamente perdendo passageiros. Essa situação foi potencializada durante a pandemia, que tornou evidente os problemas estruturais do sistema. Para contornar isso, estuda-se um Novo Marco Legal para o transporte coletivo urbano, visando reestruturar o sistema com um novo modelo e novas regras, sendo uma estratégia em nível nacional.

6.2.2 Narrativa dos cenários

Globalmente, o PIB *per capita* e o crescimento populacional são os principais fatores que impactam o aumento das emissões do setor de transportes. O AR6 do IPCC (2022) considera um crescimento da demanda de serviço em transporte em todos os cenários considerados, sobretudo para países em desenvolvimento como o Brasil. No entanto, tais países terão, até 2024, o PIB 5,5% abaixo do crescimento previsto em análises de cenários anterior à pandemia de Covid-19 (WEF, 2022). Por outro lado, os países desenvolvidos terão superado as previsões pré-pandemia em 0,9% da renda global.

Segundo WEF (2022), em um horizonte de 10 anos, os riscos ambientais serão percebidos como as ameaças críticas a longo prazo para o mundo. Pode-se citar como os riscos mais graves os de "falha na ação climática", "condições climáticas extremas" e "perda de biodiversidade", além destes, foram destacados as "crises de dívida" e os "confrontos geoeconômicos".

Dada a complexidade das mudanças tecnológicas, econômicas e sociais em escala global e a natureza insuficiente dos compromissos atuais, é provável que qualquer transição que atinja a meta de zero emissão até 2050 ocorra em um cenário desordenado (WEF, 2022).

Na análise de Lloyd's (2022), dentre os três cenários políticos analisados, aquele considerado o mais provável é o *Green Cold War*, em que é previsto que países com ideias semelhantes se unirão em torno de grandes potências para formar os chamados blocos climáticos, com competição entre eles por energia, tecnologia e domínio de mercado. Essa competição pode impulsionar o investimento e a inovação, mas aumenta consideravelmente os riscos ambientais e geopolíticos de longo prazo.

No cenário analisado por IPCC (2022), em que não é realizada nenhuma intervenção, o aumento das emissões de CO₂ pode variar entre 16% e 50%. Já os cenários em que se limita o aquecimento global a 1,5°C apontam para a necessidade de redução de 59% das emissões de carbono do setor de transportes até 2050.

Ainda, o AR6 do IPCC aponta que as emissões relacionadas ao setor de transportes dos países desenvolvidos diminuem em relação aos níveis de 2020 até 2050, mas apresentam, em alguns dos cenários, aumento das emissões em países da África, Oriente Médio, América Latina e Caribe, por exemplo. Quanto as tecnologias, no AR6 é destacado que a eletrificação da frota tende a ter um papel fundamental para o transporte terrestre, porém o uso de biocombustíveis e do hidrogênio tem importância na descarbonização em parte do transporte de carga e pode ser a principal aposta para a do transporte de aquático e aéreo.

Além disso, a infraestrutura das cidades pode impactar também na redução da demanda por serviços de transporte. Outro fator de impacto na demanda está relacionado ao comportamento que pode ser modificado, conforme observado após a necessidade de

devido às restrições de circulação para combate a pandemia de Covid-19, resultando no trabalho *home office* (IPCC, 2022). Para isso, vale ressaltar também a necessidade de uma infraestrutura de telecomunicação que permita um trabalho a distância de qualidade.

No entanto, a pandemia ao mesmo tempo que reduziu a demanda por viagens para o deslocamento de pessoas, aumentou a demanda por serviço de entrega de carga com o aumento de compras online.

Os cenários desenvolvidos nesse trabalho são divididos em dois: (i) o cenário tendencial, e (ii) o cenário de Desenvolvimento Sustentável.

Cenário Tendencial (*Business as Usual* – BAU)

O cenário BAU se caracteriza pela continuidade da predisposição do país, em que há manutenção de diversas políticas e vieses. Dessa forma, neste cenário, opções de mitigação atrativas conflitam com outros interesses de maior peso e poder de realização ou inibição.

Para o transporte de passageiros, considera-se, principalmente, o aumento da participação do transporte individual em detrimento do transporte coletivo, dado que, embora a proporção da população urbana no país tenha apresentado, entre 2000 e 2010, um aumento de 81% para 84%, a quantidade anual de passageiros transportados pelo transporte público urbano por ônibus teve uma redução significativa da demanda de passageiros. Entre 1996 e 2016, houve uma redução de aproximadamente 30% de passageiros transportados (NTU, 2018). Isto pode estar associado, entre outras razões, (i) ao histórico de implantação de políticas públicas voltadas ao uso do transporte individual

de passageiros²⁰ no país; (ii) ao aumento do valor da tarifa, de cerca de 850% entre 1996 e 2016, valor acima da inflação de 387,09% acumulada no período (NTU, 2018); (iii) ao modelo de negócio das concessões existente e predominante nas cidades brasileiras, no qual o custo do sistema é coberto pela receita tarifária; e (iv) ao baixo nível de serviço, do qual os ônibus não atendem aos padrões internacionais de conforto.

Além disso, devido às restrições de circulação pela Covid-19, houve um impacto na demanda e na oferta de transporte público por ônibus, agravando os impactos já mencionados. Esse quadro aponta para a falta de resiliência das cidades e dos serviços de transporte público.

Dessa forma, esses fatores estimulam a migração para outros meios, em particular para o transporte individual ou por aplicativo (por exemplo, Uber), devido a ascensão de novas tecnologias. A população de baixa renda opta, portanto, pela compra de automóveis usados, motocicletas ou transporte por aplicativo, esse último principalmente em curtas distâncias, que oferecem o serviço por um preço atrativo em relação transporte público por ferrovias ou por ônibus. As classes mais altas permanecem utilizando automóveis novos, resultando em uma tendência de aumento da frota circulante.

O transporte de carga, por outro lado, aponta para o aumento da participação do modo ferroviário com objetivo de reduzir a dependência do modo rodoviário, que ficou evidente após a greve dos caminhoneiros (Dantas *et al.*, 2019). Essa tendência pode ser reafirmada por duas iniciativas, o Plano Nacional de Logística – PNL, da Empresa Nacional de

²⁰ A taxa de motorização aumentou de 104 veículos por 1.000 habitantes em 1990 para 306 veículos por 1.000 habitantes em 2018 (Gonçalves *et al.*, 2019b).

Logística – EPL; e os leilões anunciados, em 2019, para a concessão da operação de ferrovias da antiga estatal Rede Ferroviária Federal S/A – RFFSA.

O PNL tem como objetivo contribuir à medida que direciona o esforço do Estado para a viabilização de determinados segmentos ferroviários, como forma de aumentar a oferta e promover a competição entre concessionários. As concessões visam desestatizar trechos ferroviários, de modo a definir uma utilidade para os bens móveis e imóveis que geram prejuízos ao Estado, permitindo também a finalização de obras não concluídas e a operação de trechos ociosos (AMORA, 2020; SILVEIRA, 2020).

Do ponto de vista da eletrificação da frota, a tendência é que ela ocorra de forma restrita, abrangendo as classes mais altas, que podem arcar com a compra de um veículo elétrico. Além disso, Sistema de compartilhamento de veículos, como *car sharing* e *ride sharing*, para o transporte de passageiros, e a adoção de caminhões leves por empresas, para o transporte de carga, terão como objetivo maior o de explorar o *marketing* verde a partir de projetos piloto.

Quanto a adoção da mobilidade elétrica para o transporte público por ônibus, esta será restrita apenas às cidades de referência como, por exemplo, Campinas, São Paulo, Curitiba e São José dos Campos, podendo, no final do horizonte considerado (2040-2050), se expandir para outras cidades de regiões metropolitanas do Sudeste e Sul.

Ainda, as barreiras à eletrificação da frota não serão superadas na maior parte das cidades brasileiras. São exemplos de barreira o elevado investimento para implementação da eletromobilidade, a ausência de políticas regulatórias e de incentivos governamentais, falta de desenvolvimento tecnológico e infraestrutura (por exemplo, recarga), investimento e incertezas relacionados à infraestrutura e operacionalização do sistema de recarga, falta de linhas de crédito/subsídios direcionados para eletromobilidade, aceitação

de nova tecnologia no mercado, e inadequação dos modelos de concessão no sistema de transporte público.

Assim, o Brasil deixa de ser exportador de veículos e passa a importar veículos alternativos, o que não é bom para o país, pois a indústria automobilística representa cerca de 20% do PIB da indústria de transformação (DAUDT e WILLCOX, 2018)

Dessa forma, os biocombustíveis continuarão sendo a principal opção de mitigação, dado que o programa Rota 2030, que visa implantar um mecanismo de estímulo tributário, reduzindo alíquotas com base no potencial de ganho em eficiência energética e alíquotas do imposto de importação para veículos elétricos e híbridos, além de autopeças, terá poucos avanços após 2030. Isso se deve ao fato de que a curva de custo *versus* ganhos em EE está saturando.

Ações para redução do número de viagens, tais como teleatividades, e a digitalização devem ocorrer apenas em grandes centros, para pessoas de altos cargos, possuindo pouco impacto na atividade do setor de transportes.

Cenário de Desenvolvimento Sustentável (CDS)

O Cenário de Desenvolvimento Sustentável é compatível com o Acordo de Paris, baseando-se em diversas ações de mitigação e alinhado à tendência internacional, com foco na descarbonização do transporte e, portanto, contribuindo para atendimento das metas nacionais estabelecidas pela atual NDC. Dessa forma, aposta em uma trajetória de emissões de GEE do país compatível com objetivo global de 1,5°C.

Nesse contexto, considera-se que o Brasil terá um planejamento estratégico de uso de energia no transporte, priorizando a redução da dependência do setor ao diesel mineral. Nesse contexto, considera-se que haverá a ampliação da rede ferroviária para passageiros

e carga. Especificamente para o transporte de passageiros, considera-se a expansão nos atuais sistemas de metrô e a possibilidade da criação de novas linhas em cidades de grande porte que ainda não possuem o sistema, bem como a inserção de novos sistemas de monotrilho e VLT em cidades de médio e grande porte.

Por sua vez, no transporte de carga haverá uma expansão significativa da malha ferroviária, bem como o crescimento em paralelo da atividade do modo aquático (navegação interior e cabotagem) dado a ações de incentivo como desburocratização, revisão dos preços do óleo combustível e do investimento em infraestrutura de interligação entre os portos e Ferrovias e rodovias. Além disso, programas como PLVB, Despoluir e Smartway irão potencializar os ganhos em eficiência energética e redução de poluentes no transporte de carga via mobilização de transportadores e embarcadores.

Especificamente, quanto a eletrificação da frota de veículos do modo rodoviário, esta será impulsionada por fatores motivadores, como melhoria da qualidade do ar e redução de ruído, modernização e qualificação do sistema de transporte urbano de passageiros, melhoria da eficiência energética, inserção do país no cenário da mobilidade elétrica e promoção do desenvolvimento regional.

No primeiro decênio, considera-se que a eletrificação se desenvolverá em cidades de referência como, por exemplo, São Paulo, que já possui metas de redução de emissões e de restrições de ônibus convencionais. No segundo decênio, considera-se que haverá maior crescimento da mobilidade elétrica em outras cidades, buscando alcançar os bons resultados e os ganhos obtidos com a eletrificação nos municípios de referência. Outros pontos de destaque que também incentivarão o processo de eletrificação nessas cidades referem-se à redução do preço das baterias, aos ajustes nos modelos de negócios, ao

estabelecimento de diretrizes nacionais, aos novos modelos de financiamento (por exemplo, Finame e Refrota), ao estabelecimento de metas nacionais e municipais.

Nesse contexto, será determinada uma diretriz nacional que, após revisar as regulações e contratos, estabelecerá as atribuições da união, estados e municípios, bem como os referências nacionais, visando orientar e definir padrões de qualidade e eficiência do sistema, que serão monitorados e avaliados periodicamente, além da comunicação e transparência do serviço prestado.

Nesse contexto, entre 2030 e 2050, em diversas cidades brasileiras, haverá desvinculação da tarifa técnica da cobrada do usuário, sendo a tarifa complementada pelo poder público²¹, contornando um problema histórico, em que os operadores, em sua maioria, são remunerados exclusivamente pelos usuários, que geralmente são de baixa renda e que arcam inclusive pelas gratuidades. Ainda, será realizada uma reforma tributária para que o setor e os contratos possuam m maior segurança jurídica, assegurando o acesso aos financiamentos disponíveis.

Nas cidades, há um escalonamento das atividades urbanas, permitindo uma melhor gestão da demanda e oferta do transporte público, que será priorizado, dado o aumento de faixas exclusivas via fundo nacional da infraestrutura do transporte, mantido via Cide Combustíveis.

Em relação aos veículos leves, a eletrificação ocorrerá, no primeiro e segundo decênio, com foco em veículos de alta intensidade de uso (frota cativa, *ride sharing* e *car sharing*), além de veículos individuais para pessoas de classes mais altas. Além disso, destaca-se a

²¹ Via fontes extra tarifárias como exploração imobiliária e contribuições do transporte individual em prol do coletivo

participação de motocicletas elétricas significativa no *market share* de motocicletas, substituindo aquelas de baixa cilindrada. Para a classe média, considera-se que haverá maior participação de veículos híbridos *flexible-fuel*.

A eletrificação do transporte de carga crescerá seguindo a mesma tendência do transporte público por ônibus, devido às medidas que o impactam serem as mesmas, porém nos primeiro e segundo decênio com foco maior no transporte urbano de carga e, no último decênio, impactando também o transporte rodoviário de longas distâncias.

Nesse cenário, considera-se, ainda, que no último decênio haverá a proibição de venda de veículos leves com motor de combustão interna, promovendo uma maior participação de elétricos em relação aos híbridos no *market share*, dado à redução dos preços para sua aquisição, devido à queda dos valores das baterias. Dessa forma, no final do horizonte (2050), espera-se um equilíbrio entre a participação de veículos elétricos, híbridos *flexible-fuel* e convencionais na frota circulante.

Ressalta-se que novas tecnologias podem conflitar com outros interesses de maior peso e poder de realização ou inibição. Nessa linha, veículos a células a combustível permaneceram com custos elevados, assim como a infraestrutura de recarga de hidrogênio. Assim, haverá continuidade de pesquisas visando reduções²² nos preços, necessitando de anos para atingir maturidade tecnológica acima de 7.

Além disso, no último decênio, devido à conscientização da população, das empresas e dos gestores públicos, haverá uma maior preocupação com a qualidade de vida nas

²² Podendo usar diretamente o etanol ou exigir o hidrogênio em diferentes graus de pureza. Além disso os seguintes desafios devem ser superados no caso do hidrogênio: tecnológicos, equipamentos relacionados à segurança, dificuldade no transporte e armazenagem, investimento inicial elevado, arcabouços institucionais, legais e regulatórios

idades, sendo implementado o conceito de cidades para pessoas, considerando como prioridade o transporte ativo, a micromobilidade elétrica (bicicletas e patinetes) e a redução do número de viagens por meio de teleatividades, como teletrabalho, teleconferência, e-commerce, ensino a distância.

Isto posto, vale destacar o papel dos denominados Empregos Verdes²³, que, em 2015, no Brasil, representavam 6,42% dos empregos formais e informais. O setor de energia elétrica figura como um dos setores que possuem mais empregos verdes do que não verdes, e essa proporção será maior neste cenário devido a ampliação na oferta de biocombustíveis e de empregados associados ao transporte coletivo e de alta capacidade. Ainda, nesse cenário, a cadeia produtiva automotiva brasileira seguirá as cadeias globais, continuando relevante no mercado internacional e gerando empregos.

Em 2020, as teleatividades cresceram significativamente devido às imposições de quarentena e afastamento social com a pandemia do Covid-19, e parte dessa tendência será mantida no cenário de desenvolvimento sustentável.

O aumento da eficiência energética ocorrerá devido ao atendimento as metas do Rota 2030 e 2050, além da hibridização e eletrificação dos veículos. Além disso, no caso do transporte de carga, haverá aumento da eficiência logística dado o desenvolvimento de programas como Programa de Logística Verde Brasil – PLVB, e os da Confederação Nacional do Transporte - CNT.

²³ Denominados como “aqueles empregos em empresas que produzem bens ou prestam serviços que beneficiam o meio ambiente ou conservam recursos naturais e/ ou empregos nos quais as obrigações dos trabalhadores envolvem tornar os processos de produção de seu estabelecimento mais ecológicos ou usar menos recursos naturais” (Pereira Filho, 2022)

No caso do modo aéreo, a Organização de Aviação Civil Internacional – OACI, em 2010, estabeleceu o aumento anual de 2% da eficiência energética do setor até 2050, tendo como meta o crescimento neutro de carbono a partir de 2020, por meio de melhorias tecnológicas e operacionais, uso de combustíveis alternativos (por exemplo, bioquerosene), conforme estabelecido pela Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC (ANAC, 2015 *apud* COSTA, 2019). Nesse cenário, considera-se que essa meta será alcançada ou mesmo superada até 2050.

Em relação aos biocombustíveis, embora tenha uma tendência a ser menos consumido conforme a eletrificação da frota ocorra, principalmente, para o modo rodoviário, seu uso não será descontinuado. Dessa forma, sua demanda será realocada em sinergia com a eletromobilidade, possibilitando aumento nas misturas regulamentadas, incentivo ao uso em outros modos de transporte e investimentos em biocombustíveis avançados e que seu uso possa ser destinado a outros modos.

Nessa linha, pode-se citar como exemplo o biodiesel que, mesmo com aumento da participação de veículos elétricos ultrapassando o número de veículos híbridos no último decênio, poderá ter seu percentual de mistura aumentado nos veículos com MCI ainda existentes, mantendo a sua produção e uso. Além do biodiesel, espera-se que biocombustíveis avançados, como o HVO (*Hydrotreated Vegetable Oil*) atinja cerca de um terço dessa mistura. Ainda, o biodiesel será direcionado também para uso no modo aquático, no qual a eletrificação não terá alcance representativo até 2050.

O etanol continuará a ser utilizado em veículos híbridos *flexible fuel* e nos veículos convencionais do Ciclo Otto. No último decênio, espera-se que haja uma produção relevante de etanol de gerações avançadas, sobretudo do bagaço de cana-de-açúcar, reduzindo os impactos ao meio ambiente.

Além desses, novos biocombustíveis, como bioquerosene e bio-óleo, terão participação relevante no modo aéreo (internacional) e aquático, respectivamente, que não possuem previsão de eletrificação significativa até o último decênio considerado no horizonte temporal desse estudo.

Por fim, é importante a implementação efetiva de um programa de inspeção técnica veicular periódica, de forma a fiscalizar e monitorar a frota circulante, permitindo o acompanhamento da evolução dos veículos do modo rodoviário, modo mais representativo em atividade, energia e emissões.

6.2.3 Síntese das premissas e tecnologias consideradas

Em relação ao cenário econômico, considerou-se que a recuperação brasileira começará entre 2021 e crescerá a uma taxa média anual de 2,50% a.a. até 2030 (PRATES, *et al.* 2021), 2,25% a.a. entre 2031 e 2040 e 2% a.a. entre 2041 e 2050 (LA ROVERE, *et al.*, 2021). Quanto ao crescimento populacional, estima-se que a população brasileira crescerá cerca 7,1% até 2030, passando de 210 milhões (2019) para 225 milhões em 2030 (Prates, *et al.* 2021) e 233 milhões em 2050 (LA ROVERE, *et al.*, 2021). Além disso, a parcela da população urbana passará do atual 86% para 88% em 2030 (PRATES, *et al.* 2021) e 89% em 2050 (LA ROVERE, *et al.*, 2021). Por fim, a população em idade ativa atingirá o pico em 2035 (PRATES, *et al.* 2021).

Em relação a estimativa do barril de petróleo, considera-se que o valor irá reduzir até 2025, chegando a 50 dólares por barril e permanecendo constante, ou seja, nesse cenário o pré-sal continua viável. Esse valor está em linha com os estudos Petrobras (2020), Prates, *et al.* (2021) e La Rovere, *et al.* (2021).

Após a definição do cenário macroeconômico, parte-se para o levantamento e análise, por meio de uma revisão documental, de medidas de mitigação, premissas e hipóteses para o horizonte do estudo. Para isso, foram avaliadas seis esferas: (i) necessidade de viagens; (ii) infraestrutura; (iii) mobilidade; (iv) introdução de novas tecnologias; (v) eficiência energética; e (vi) biocombustíveis.

Além da revisão documental, destaca-se a participação ativa do autor grupos de trabalho nos quais foram discutidas tais medidas, são eles: Comissão de Ciência & Tecnologia (CC&T) da Plataforma Nacional de Mobilidade Elétrica (PNME), Grupo de Trabalho de Intermodalidade e Infraestrutura da Câmara Temática de Transportes do Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas, Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas (FBMC), nas reuniões da Comissão de Avaliação e Acompanhamento do Programa de controle de emissões veiculares (PROCONVE) e Programa de Controle da Poluição do ar por Motociclos e Veículos Similares (PROMOT) e no Selo Verde em Transporte de Carga (SVTC) do Programa de Logística Verde Brasil (PLVB).

Ademais, destaca-se ainda a produção de estudos-chave derivados do estudo aqui apresentado, que contribuem direta ou indiretamente com os cenários futuros de transportes. Entre os estudos, destacam-se: “Roadmap para cadeia de desenvolvimento e implantação da eletromobilidade no Brasil”, “Caderno de Referência de Transição para uma Mobilidade Urbana Zero Emissão”, “Desenvolvimento de propostas de Normas e Regulamentos para Mobilidade Elétrica no enquadramento do Brasil”, “*Enabling Conditions For Investment In The Transition To A Low-Carbon Society In Latin American Countries*”, “Estudo de propostas de critérios diferenciados para o financiamento de ônibus elétricos no Programa Refrota”, “*Preparation of modeling to estimate the socioeconomic impacts of the adoption of a carbon pricing*”, “Laboratório

Vivo de Mobilidade: Alternativas de mobilidade de baixo carbono”, “Análise Técnica da Proposta de Modelagem e Metas do Renovabio”, “Viabilidade para adoção de B20 na frota de ônibus do Município do Rio de Janeiro” e “Avaliação da viabilidade econômica e o impacto na tarifa para o uso de ônibus elétricos a bateria (*Plug-in*) em regiões selecionadas no Brasil”.

Isto posto, a pré-seleção foi realizada a partir do conhecimento adquirido ao longo do desenvolvimento dos estudos supracitados. A partir disso, foram selecionados *stakeholders*, de todas as seis esferas, para avaliar medidas de mitigação, premissas e hipóteses, além de validar os resultados preliminares. Para isso, foi organizado um *workshop* de um dia, com a presença de 40 *stakeholders*. Uma apresentação com duração de três horas e meia foi realizada com conteúdo, que consiste na análise histórica e diagnóstico do setor, análise dos resultados preliminares e nivelamento a respeito dos principais conceitos, medidas de mitigação e tecnologias do setor de transportes.

Por fim, foram dedicadas duas horas de interação entre os *stakeholders* e os palestrantes por meio da mesa redonda e do grupo focal, sendo debatidos a validação e participação de cada ação de mitigação, bem como a versão final do método TEMA e suas variáveis de entrada e saída. O Apêndice I apresenta mais detalhes a respeito desse *workshop*, bem como daqueles realizados anteriormente e que serviram de base para o aprimoramento do TEMA, dos cenários desenvolvidos e do IV *Workshop*.

A síntese das premissas após ajustes e validação dos *stakeholders* é apresentada na Tabela 6.5, enquanto a relacionada à implantação das principais medidas de mitigação do setor de Transportes e instrumentos para superar essas barreiras, na Tabela 6.6.

Tabela 6.5: Síntese das premissas e estratégias após validação do *stakeholders*

Escopo		Premissas por cenário	
		BAU	CDS
Biocombustíveis	Mistura regulamentada	B15 (2023), B20 (2035)	B20 (2030), B30 ¹ (2040), B40 ¹ (2050)
	(% em volume)		
Mercado	Market share de Etanol Hidratado (% de usuários de veículos flex que optam por abastecer com Etanol hidratado)	34% (2025), 38% (2030), 35% (2050)	37% (2025), 48% (2030), 70% (2050)
	Fim das vendas de MCI (veículos leves)	2050	2045
Eletromobilidade	BEV	Leves (10%), transporte público (19%), caminhões TUC (9%)	Leves (20%), transporte público (50%), caminhões TUC (16%)
(% médio de licenciamentos e da frota circulante em 2030)			
(-74% no custo da bateria em 2050 em relação a 2020)	Híbrido flex-elétrico	Leves (40%), transporte público (5%), caminhões TUC (1%)	Leves (30%), transporte público (5%), caminhões TUC (2%)
Eficiência energética	Programas de certificação	Rota 2030, Eventual Rota 2050, PBEV, PLVB, despoluir etc. sendo mais ambicioso no CDS	
Otimização e diversificação dos modos de transportes de carga	Expansão das malhas ferroviária e aquática	Conclusão dos programas em andamento (PAC e PPI).	Conclusão dos programas em andamento, adequação da malha ferroviária, ajustes de contratos de concessão ou de renovação de concessão
Mobilidade urbana	Captação de usuários para modalidades menos intensivas em carbono	Conclusão de obras em andamento do PAC/Avançar (BRT, VLT, metrô e trens) – intervalo de 5 anos para BAU e entregues no prazo no CDS	
		Redução progressiva da necessidade de realização de viagens (<i>Home office</i> , IoT etc.) e melhoramento da eficiência do sistema de transportes	
		Manutenção da evasão de usuários do sistema de transporte coletivo de passageiros por ônibus (TCPO)	Recuperação gradual dos usuários do TCPO, alcançando em 2030 o patamar da demanda pré-recessão e aumentando sua participação até 2050. Devido ao novo marco legal, espera-se: Qualificação da frota de ônibus; expansão da implantação de faixas exclusivas; aumento da

Escopo		Premissas por cenário	
		BAU	CDS
			política de integração física, temporal e tarifária.
		-	Difusão do transporte ativo e políticas de indução de demanda
		-	Participação efetiva do segmento de compartilhamento de viagens e veículos
Atividade (% de p.km em 2050)	Transporte ativo	3%	6%
Ferrovias	Eletrificação	-	13% da malha ferroviária útil em 2050

Tabela 6.6: Síntese das medidas de mitigação, barreiras e instrumentos

Medida de Mitigação	Barreiras	Instrumentos
Qualificação do transporte público por ônibus	<ul style="list-style-type: none"> a. Priorização do transporte motorizado individual b. Presença predominante de ônibus básicos c. Modelos de negócio defasados d. Falta de integração de ações (esferas de tomada de decisão) 	<ul style="list-style-type: none"> a. Desenvolvimento de novos modelos de negócio, incorporando matrizes de risco e novas tecnologias b. Revisão das políticas tarifárias e contratos vigentes c. Integração física, tarifária e temporal d. Linhas de crédito diferenciadas para tecnologias eficientes
Difusão do transporte ativo	<ul style="list-style-type: none"> a. Falta de infraestrutura b. Segurança precária c. Educação 	<ul style="list-style-type: none"> a. Investimento público b. Educação e conscientização c. Fiscalização d. Integração física
Biocombustíveis	<ul style="list-style-type: none"> a. Falta de políticas pública para adotar frações diferenciadas (HVO) b. Possível aumento do custo com manutenção dos veículos em misturas superiores à 10% (biodiesel) c. Entraves logísticos de mercado d. Instabilidade dos preços e paridade com gasolina (etanol hidratado) 	<ul style="list-style-type: none"> a. Incentivos a biocombustíveis <i>drop-in</i>, principalmente para misturas regulamentadas superiores à 10% de biocombustíveis no diesel mineral b. Desvincular a política de preços do etanol ao valor da gasolina c. Estimular a produção local para atendimento da demanda doméstica e exportação
Ganhos de eficiência no transporte de carga por meio da adoção de boas práticas	<ul style="list-style-type: none"> a. Falta de capacitação e/ou conhecimento dos entes privados b. Custos adicionais c. Frota envelhecida d. Falta de priorização dos embarcadores 	<ul style="list-style-type: none"> a. Diretriz nacional em eficiência energética do transporte de carga b. Programas de reconhecimento e certificação
Expansão e eletrificação do transporte ferroviário de carga	<ul style="list-style-type: none"> a. Custos adicionais b. Falta de políticas públicas (definição de prioridade) c. <i>Lobby</i> de setores contrários (rodoviário e ferroviário) d. Linhas improdutivas e não padronizadas 	<ul style="list-style-type: none"> a. Qualificação de ferrovias b. Mecanismos de financiamento em conjunto com o setor privado c. Investimentos em terminais intermodais d. Marco regulatório para reformar as cláusulas não produtivas, estimulando a competição entre as concessionárias e. Revisão de contratos improdutivos

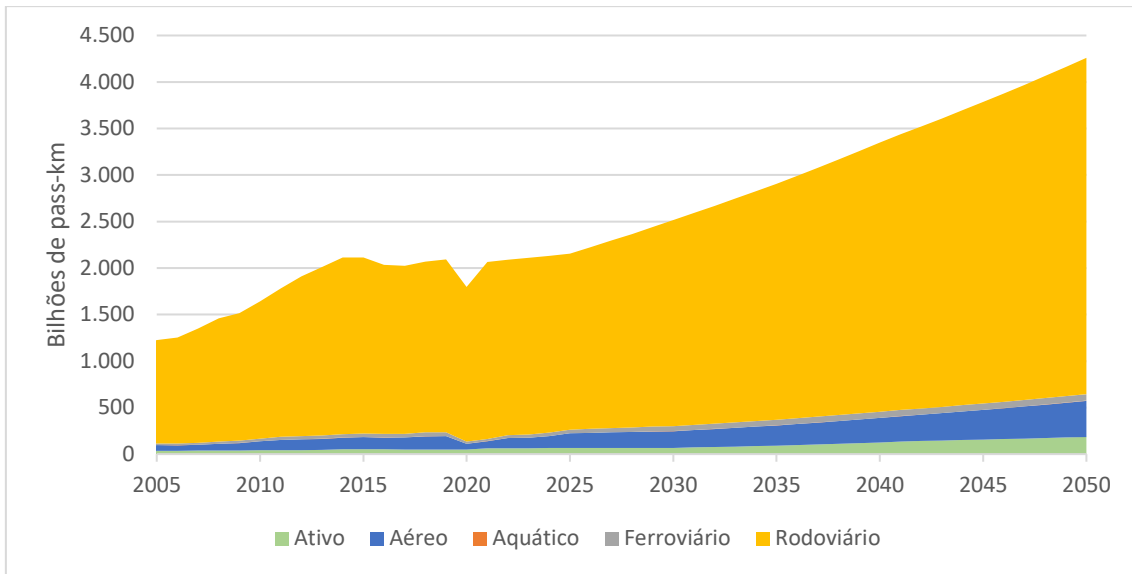
Medida de Mitigação	Barreiras	Instrumentos
		d. Taxação de carbono no diesel f. Conexão inter-regional entre ferrovias e hidrovias
Mobilidade elétrica	a. Falta de infraestrutura de recarga b. Falta de algumas N&R (interoperabilidade, logística reversa etc.) c. Instabilidade da moeda d. Baixa aceitação de mercado em alguns segmentos e. <i>Lobby</i> de setores contrários (indústrias agro e de veículos convencionais) f. Falta de linhas de crédito específicas g. Falta de priorização nacional da política de uso de energia em transportes h. Modelos de negócio defasados (transporte por ônibus)	a. Investimento em infraestrutura de recarga, sobretudo em rodovias estaduais e federais b. Educação e conscientização de formuladores de política e potenciais usuários c. Linhas de crédito diferenciadas para tecnologias eficientes d. Desenvolvimento de cadeia de valor e. Incentivos financeiros (redução de impostos, sistemas <i>bônus/malus</i> , financiamento etc.) para novos modelos de negócios e tecnologias f. Desenvolvimento de novos modelos de negócio, incorporando matrizes de risco e novas tecnologias

¹complementando com HVO – *Hydrotreated Vegetable Oil*

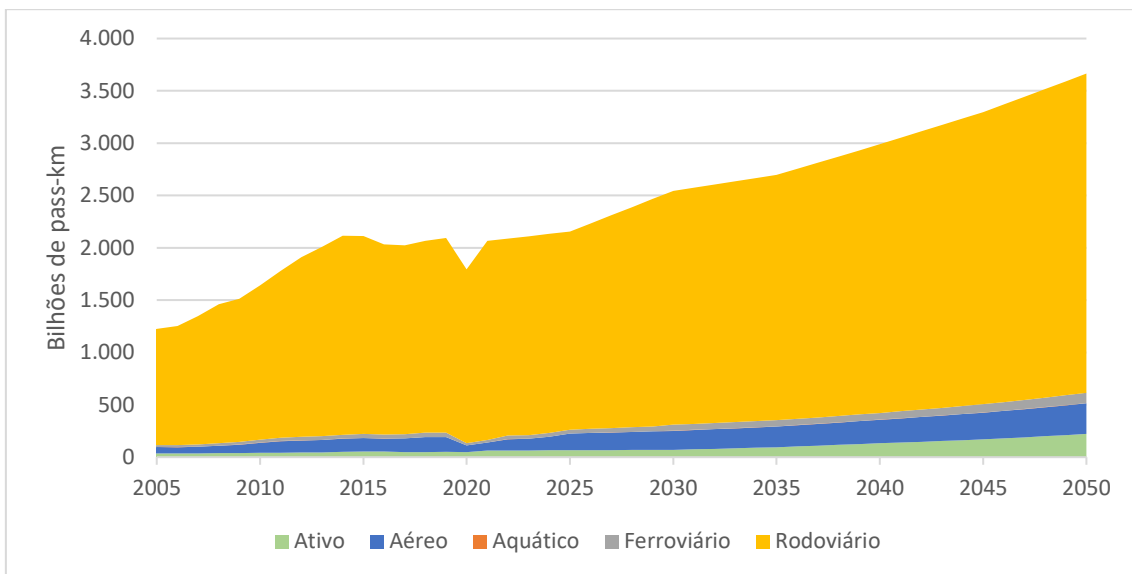
6.3 RESULTADOS DOS CENÁRIOS ESTIMADOS

Os resultados apresentados neste Capítulo refletem as premissas escolhidas, em função do amplo horizonte de projeção (2021-2050) e da grande quantidade de variáveis do modelo que podem sofrer mudanças em função de situações imponderáveis que possam vir a ocorrer no futuro, fazendo-se necessária, então, a revisão periódica deste trabalho.

Os resultados apontam para um crescimento médio de 75% da atividade de passageiros em 2050 em relação a 2019. No caso do transporte de carga, espera-se um crescimento médio de 80% da atividade. No entanto, em ambos os casos, a atividade de transporte do cenário BAU é superior à do CDS, devido ao aumento, em maior grau, das teleatividades e do adensamento das cidades, no caso de passageiros, e devido à otimização logística, no caso do transporte de carga. A Figura 6.25 apresenta a evolução da atividade de passageiros para ambos os cenários e a Figura 6.26, a evolução da atividade do transporte de carga.

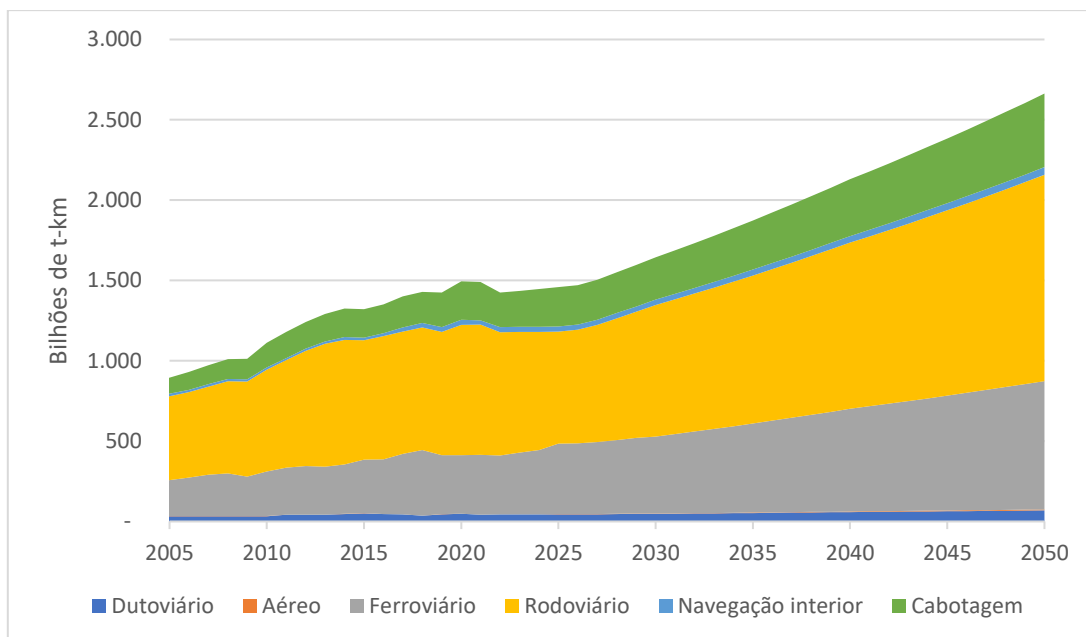


(a)

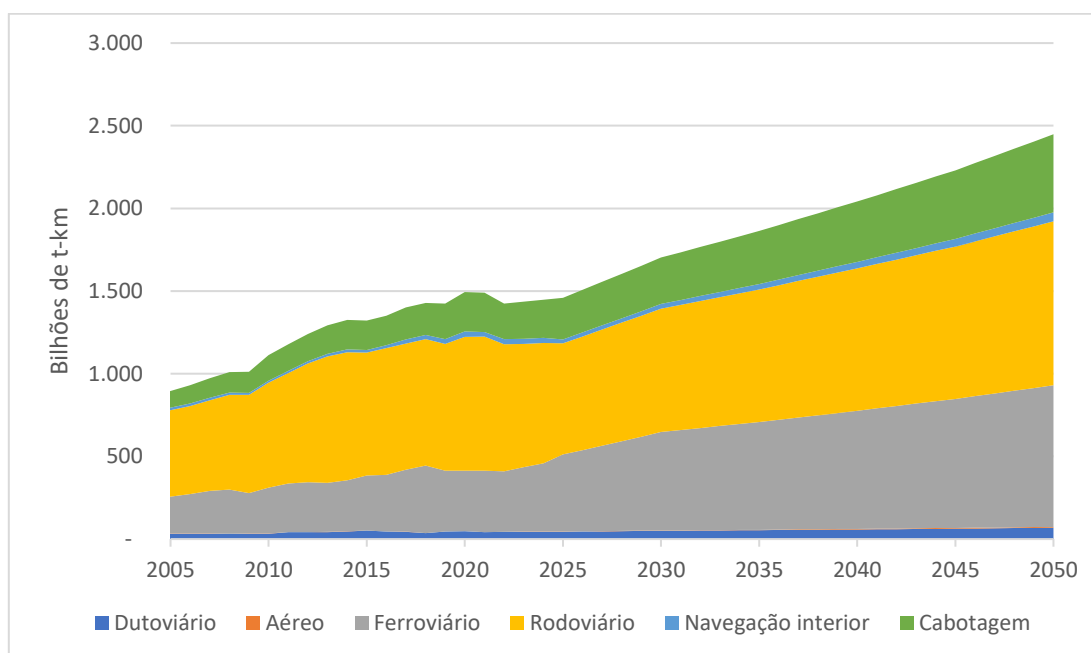


(b)

Figura 6.25: Evolução da atividade de passageiros por modo de transporte para o cenário BAU (a) e CDS (b)



(a)

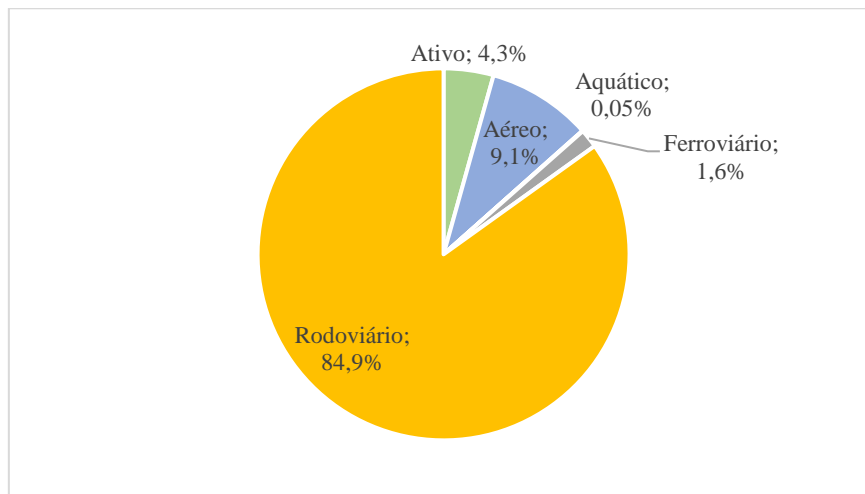


(b)

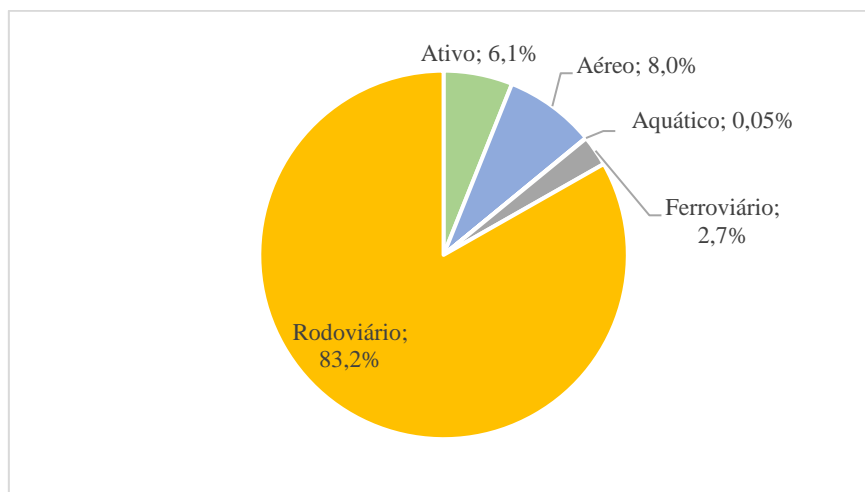
Figura 6.26: Evolução da atividade de carga por modo de transporte para o cenário BAU (a) e CDS (b)

Analisando a evolução da atividade de passageiros, observa-se que a atividade de 2022 é similar à de 2019 (pré-pandemia) e, a de 2023, é 0,8% superior. No entanto, espera-se que a demanda energética seja superior (0,3%), já em 2021, em relação àquela de 2019.

Ainda, em ambos os cenários, o modo rodoviário continua sendo o responsável por mais de 85% no cenário BAU e de 83% no CDS. Além disso, observa-se uma maior participação do transporte ativo e ferroviário de passageiros no cenário CDS em relação ao BAU, mas aponta para uma queda no transporte aéreo. A Figura 6.27 apresenta a divisão modal de 2050 para ambos os cenários.



(a)



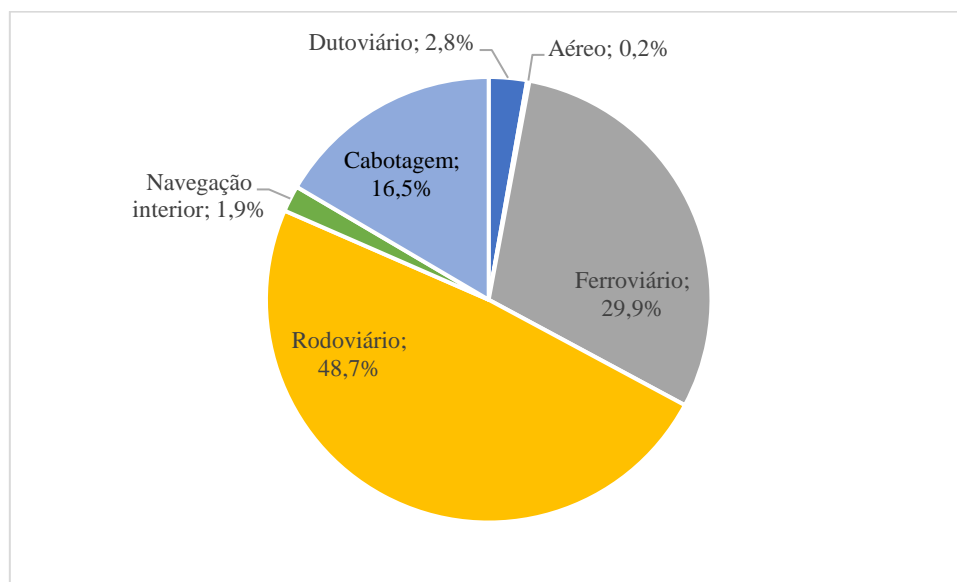
(b)

Figura 6.27: Divisão modal do transporte de passageiros do cenário BAU (a) e CDS (b) - 2050

Ao contrário do transporte de passageiros, no transporte de carga, avaliando a Figura 6.26, observa-se uma menor participação do transporte rodoviário, sendo cerca de 49% no

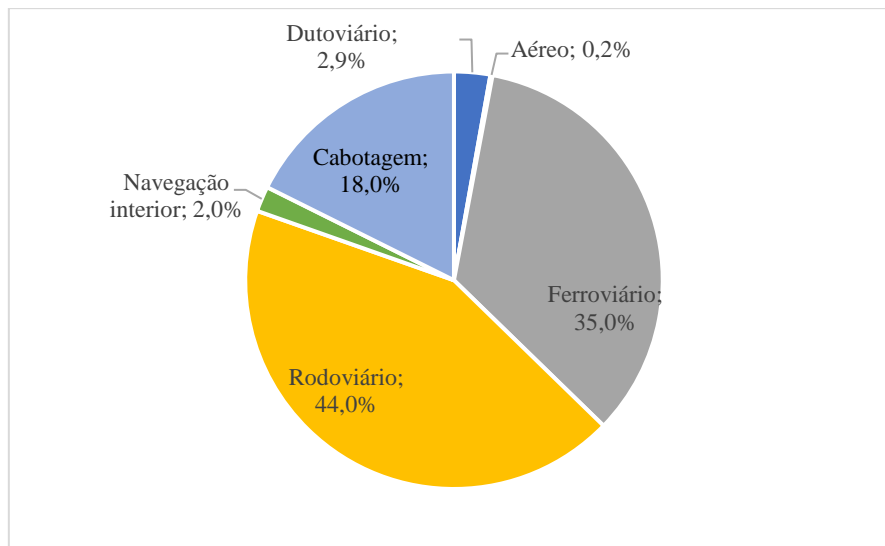
cenário BAU e 44% no cenário CDS (Figura 6.28). Essa redução da participação rodoviária se dá devido ao estímulo dos modos de alta capacidade que devem continuar o ritmo dos últimos anos.

Isto posto, considera-se as obras para renovações da malha ferroviária sumarizadas no Plano Nacional de Logística (PNL) (EPL, 2021b) e continuidade no processo de investimentos, além do programa BR do Mar²⁴, que ampliará a atividade por cabotagem, que será potencializada no cenário CDS por investimentos portuários e em vias de acesso. Dessa forma, o cenário BAU é similar ao cenário conservador do PNL. Por sua vez, o cenário CDS é próximo aos cenários otimistas do PNL. Ademais, no CDS, 13% da malha ferroviária será eletrificada, além de aumentar a eficiência energética e reduzir a demanda por óleo diesel, poderá servir de indutor de infraestrutura de recarga para veículos elétricos no entorno de sua malha.



(a)

²⁴ Promoverá a entrada de novos operadores, além de diminuir a burocracia do segmento, dada a oermissão de contratos temporários para uso da infraestrutura portuária.



(b)

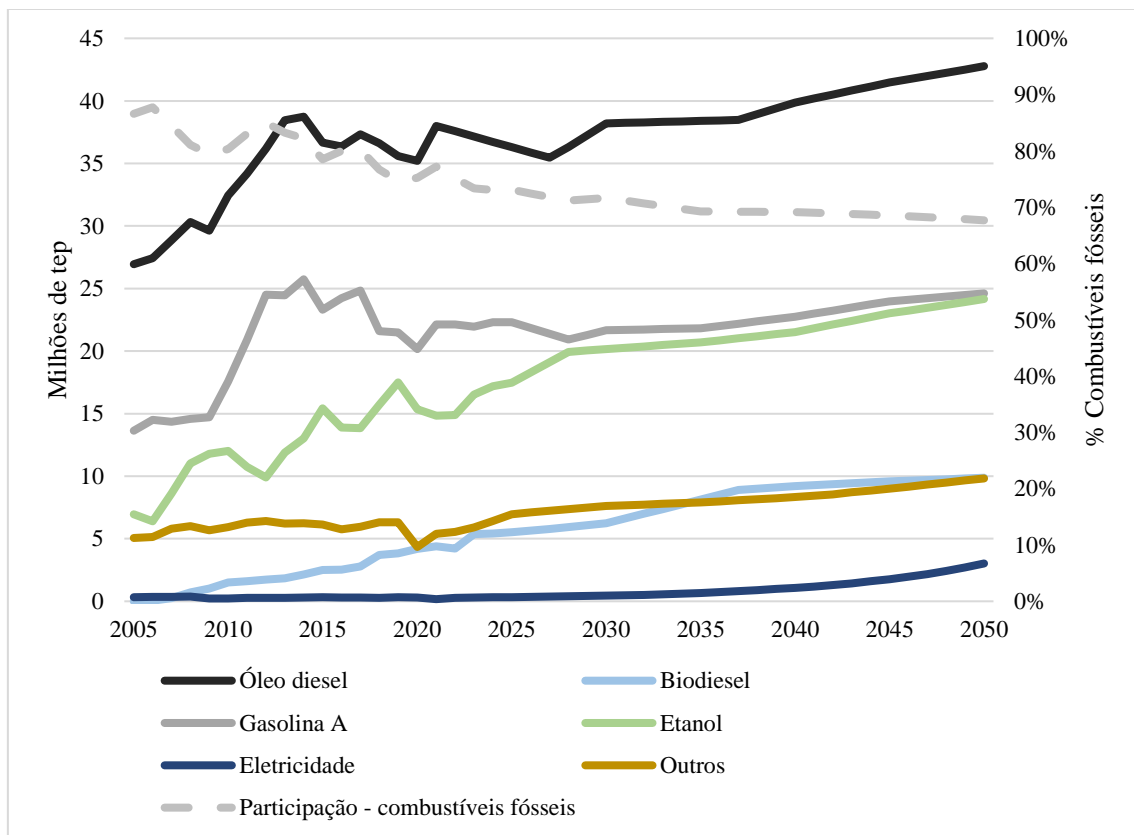
Figura 6.28: Divisão modal do transporte de carga do cenário BAU (a) e CDS (b) - 2050

Quanto a frota de veículos do modo rodoviário, os resultados apontam para um crescimento, no cenário BAU, de cerca de duas vezes e meia para os veículos leves de passageiros em 2050 (149,9 milhões), destacando o crescimento da frota de motocicletas que representaram cerca de 29% da frota do transporte individual. Esse crescimento é inferior no CDS, em que a frota de veículos leves é de cerca de 108 milhões de veículos. No entanto, a frota de ônibus, e sua participação na atividade, é superior em relação ao cenário BAU, dado a recuperação da demanda do sistema e transferência modal do transporte individual para o coletivo.

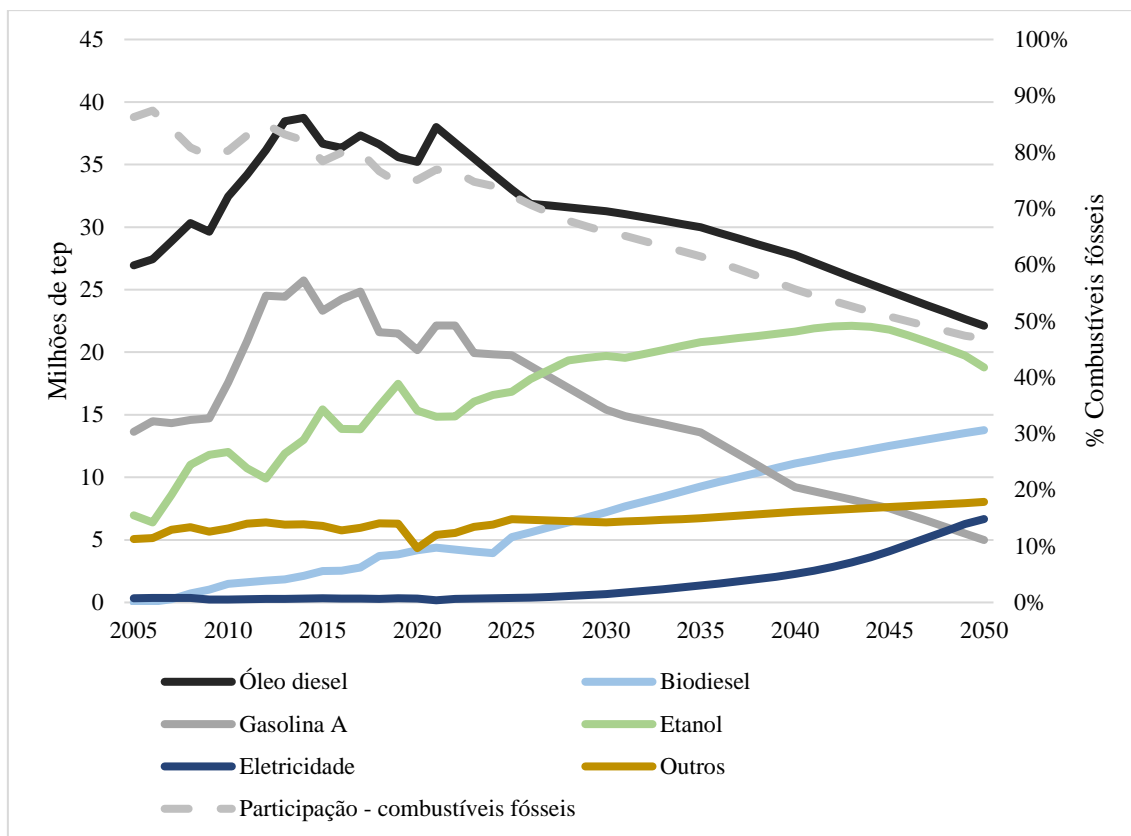
No caso dos caminhões, a frota é 18% inferior, devido a menor participação do transporte rodoviário no CDS e da otimização logística. Quanto a participação por categoria, os veículos do transporte urbano de carga são mais representativos nesse cenário que no cenário BAU, dada a migração do transporte de carga, de longas distâncias, por caminhões semipesados e pesados para modos de alta capacidade, mas houve a manutenção do transporte urbano de carga pelo transporte rodoviário. Ainda, a atividade

urbana de carga é superior no CDS, pois com a redução do deslocamento de passageiros devido a disseminação das teleatividades, espera-se um aumento superior (em relação ao BAU) do e-commerce de alimentos e produtos acabados. O Apêndice II apresenta a evolução da frota de veículos do modo rodoviário por tipo de veículo e tecnologia em cada cenário.

As implicações ambientais das mudanças nos padrões de transporte de passageiros e carga, juntamente com todas as hipóteses, são observadas no uso de energia. Isso se deve à migração para modos ou segmentos mais eficientes e a melhorias gerais na eficiência energética após a aplicação de todas as ações de mitigação, notadamente no CDS. A Figura 6.29 apresenta a evolução da demanda energética em ambos os cenários, além da participação dos combustíveis fósseis.



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria.

Figura 6.29: Evolução da demanda energética por tipo de energia - BAU (a) e CDS (b)

A demanda total de energia passa dos atuais 80 milhões de tep, em 2020, para 94 milhões de tep, em 2030, e 114 milhões, em 2050, no cenário BAU. No entanto, no cenário CDS, estima-se, para 2030, uma demanda de 81 milhões de tep, demanda similar à de 2020 e 5% inferior à de 2019. Em relação ao final do horizonte, a demanda prevista para o CDS é de 74 milhões de tep, uma redução de aproximadamente 35% se comparada à demanda do cenário BAU e, de 13% em relação a 2019.

Em 2020, o óleo diesel representava 44% do consumo de energia do setor de transportes brasileiro. Essa participação tende a ser de cerca de 37%, em 2050, no cenário BAU, e, de 30% no CDS. Contudo, a demanda por óleo diesel diminui no cenário CDS, sendo 18% menor que a demanda ocorrida no início do horizonte (2005).

Além disso, a demanda por gasolina A no cenário BAU é similar à demanda histórica, dado os ganhos em eficiência energética, à introdução de veículos elétricos e híbridos e ao atendimento das metas do RenovaBio. Isso é potencializado no cenário CDS, em que há queda na demanda por gasolina A em detrimento da demanda de etanol hidratado e eletricidade, além da migração de usuários para o transporte público coletivo.

Isto posto, a demanda por combustíveis fósseis no cenário BAU diminui dos atuais 75% para 68% em 2050. Já no cenário CDS, essa queda é acentuada, alcançando apenas 47% de participação, ou seja, no final do horizonte do CDS, mais da metade da energia consumida será de biocombustíveis e eletricidade.

Apesar da tendência internacional da massificação da mobilidade elétrica (BP, 2018; IEA, 2020; IPCC, 2021), esse tipo de energia é representativo apenas no cenário CDS, com 9% de participação, devido a representação dos veículos elétricos na frota circulante ser próxima à do cenário de desenvolvimento sustentável do “Resto do Mundo”, do Global EV Outlook 2020 (IEA, 2020).

O padrão de consumo energético do setor de transportes para cada cenário é refletido nas emissões de GEE. Isto posto, a Figura 6.30 apresenta a trajetória futura das emissões de CO₂e.

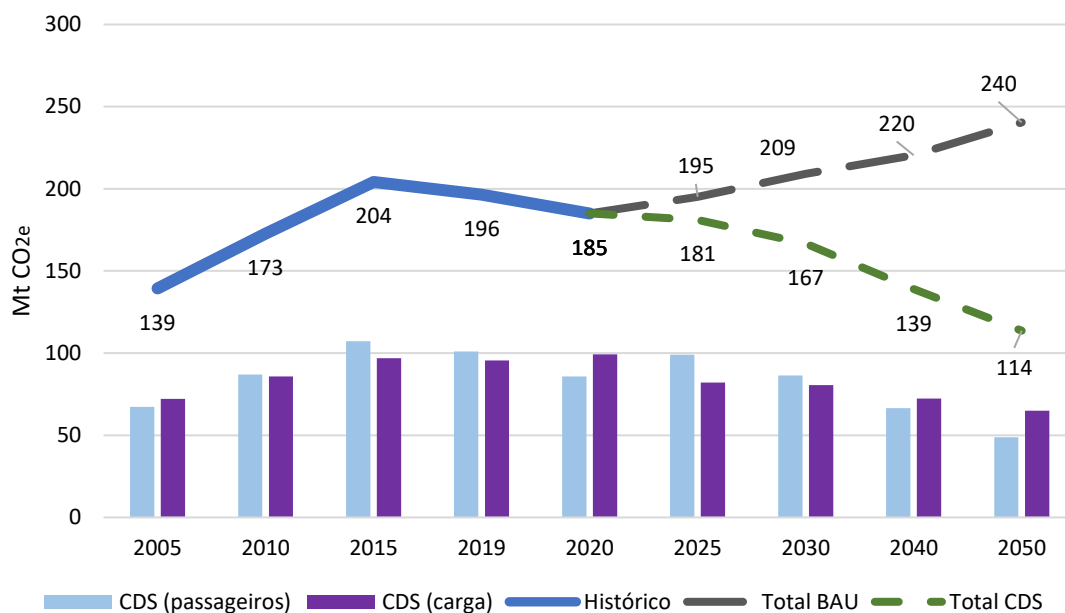


Figura 6.30: Evolução das emissões de CO_{2e} em ambos os cenários.

Os resultados apontam que, em um cenário tendencial que considera apenas as políticas históricas, as emissões tendem a acompanhar o crescimento econômico do país, aumentando cerca de 13% até 2030 e, 30% até 2050, em relação a 2020. Por outro lado, considerando o ano base de 2005, da NDC, o aumento será de 40% até 2025, 50% até 2030 e 72% até 2050.

No entanto, no CDS, espera-se uma mitigação de 10% em 2030 e, 39% em 2050 em relação a 2020, apresentando em 2040, emissões similares às de 2005. No entanto, em 2050, espera-se uma mitigação de 18% em relação ao ano base da NDC. Ainda, ao comparar os cenários estudados, observa-se uma mitigação de 20% em 2030 e de 53% em 2050. Isso se deve a diferença na intensidade de carbono, sendo 71% menor, no caso de passageiros, e 61% menor em carga.

Os resultados das emissões desagregadas por tipo de atividade apontam que, no CDS, as emissões do transporte de carga são inferiores à de passageiros até 2030, mas o ultrapassam a partir de 2040, atingindo 52% do total emitido pelo setor nesse ano e 57%

em 2050. Isso se deve ao menor número de opções tecnológicas e fontes de energia ofertadas historicamente. Como comparação, em 2019, a participação do transporte de carga era de 49%, passando para 54% em 2020, dada a redução na atividade do transporte de passageiros devido ao impacto das restrições relacionadas ao combate da pandemia de Covid-19.

Vale ressaltar que a meta da NDC considera o somatório de todos os setores para a redução das emissões nacionais de carbono. No entanto, entende-se que o setor de transportes é um setor chave para auxiliar o atendimento das metas, pois pode proporcionar diversos co-benefícios para a população e para o país.

7 CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta tese se propôs elaborar cenários prospectivos para uso de energia e para emissões GEE do setor de transportes brasileiro por meio da aplicação do método desenvolvido, que considera uma abordagem multinível, contemplando a consolidação da série histórica; levantamento e seleção de premissas e hipóteses e validação por meio de *workshops* com *stakeholders*; narrativa dos cenários; definição de indicadores; e calibração das estimativas.

Para esse propósito, realizou-se uma pesquisa bibliográfica sistemática em modelagem de atividade de transporte, energia e emissões de GEE no intuito de identificar como tem sido abordada a modelagem em termos metodológicos, e uma revisão documental sobre os principais *softwares* e guias de modelagem existentes em outros países. Após o levantamento e análise preliminar de 89 artigos científicos e 150 métodos (guias e/ou *softwares*), foram selecionados e analisados 19 estudos e 21 métodos.

Os resultados da revisão evidenciam lacunas no conhecimento quanto: (i) à modelagem do histórico de emissões e da demanda de energia; (ii) detalhamento do processo de elaboração de cenários e/ou do método adotado; (iii) consideração de todos os modos de transporte, incluindo o transporte ativo e o modo dutoviário; (iv) utilização da abordagem *tier 3* para os GEE CH₄ e N₂O; (v) nivelamento e participação ativa de *stakeholders*; e (v) calibração dos resultados da abordagem *Bottom-up* com a estimativa da atividade de transporte e demanda energética (ASIF e/ou *Top-down*) específica para o setor de transportes.

Além disso, a maior parte dos trabalhos identificados na revisão modelaram apenas o modo rodoviário. Essa escolha deve ser observada com cautela, uma vez que os modos de transporte se comportam de maneira sistêmica. Ainda, mesmo quando o estudo

considerava apenas o modo rodoviário, veículos como motocicletas não foram incluídos e analisados. Dessa forma, defende-se, na metodologia proposta, a estimativa de todos os veículos representativos e de todos os modos disponíveis do setor no país de estudo, devendo ser considerada uma característica fundamental de modelos para cenários prospectivos, uma vez que os modos de transporte sofrem interferências mútuas ao longo do tempo.

Ainda, a revisão da literatura apontou que apenas três dos estudos levantados realizaram consulta a especialistas para selecionar as premissas e hipóteses. No entanto, não há indícios que o histórico e diagnóstico do setor foi apresentado e que algum tipo de nivelamento foi realizado.

Assim, o método desenvolvido considera as lacunas na literatura e se baseia em uma abordagem multinível, considerando a abordagem *bottom-up*, utilizada de forma conjunta as abordagens ASIF e *top-down*, além de uma análise qualitativa com participação ativa de *stakeholders*, visando calibrar a evolução da atividade de transporte e do consumo de energia, permitindo análise de consistência de dados, validação, consolidação e ajuste dos *inputs*, de maneira desagregada, proporcionando uma maior sensibilidade na análise e nos ajustes, garantindo então a consistência dos resultados.

Além disso, o método enfatiza a necessidade de esforços colaborativos multissetoriais para entender o uso de energia. Com isso, foi possível estimar o histórico (1970-2020) e estabelecer dois cenários para o setor de transportes para o Brasil até 2050

As projeções consideraram dados macroeconômicos para simular o crescimento da atividade de transporte para o horizonte 2021-2050. Outrossim, um conjunto de ações de mitigação e premissas para o setor de transporte brasileiro foram identificadas na

literatura e discutidas por especialistas do setor em quatro reuniões realizadas na forma de *Workshops* (Apêndice I).

Destaca-se, ainda, as contribuições do estudo na estimativa do histórico do setor, incluindo a análise do impacto das restrições relacionadas ao combate da pandemia de Covid-19. Além disso, ajustes e atualizações foram realizados de modo a permitir estimativas mais precisas para a frota circulante, por meio da utilização de informações sobre veículos adimplentes e inadimplentes por meio do levantamento do seguro DPVAT.

Destaca-se, também, a revisão do rendimento energético da categoria caminhões e ônibus, cujos coeficientes variam anualmente durante o horizonte temporal do modelo. Por fim, a intensidade de uso e a divisão dos ônibus por subcategorias foram ajustadas de forma a serem mais próximas a realidade da operação desses veículos no transporte doméstico.

Por conseguinte, os resultados indicam que o Brasil pode estar em curso para uma matriz energética intensiva em biocombustíveis, seguindo as políticas vigentes, com foco na eficiência energética dos veículos leves e na ampliação da oferta de biocombustíveis, ou, por outro lado, adicionalmente a isso, pode considerar uma visão estratégica do uso de energia em transportes, buscando um cenário de desenvolvimento sustentável, com foco na ampliação, integração e qualificação da infraestrutura e sistemas de transportes, além da eletrificação de atividades-chave, como o transporte público por ônibus e o transporte de carga, que embora utilizem veículos que representam menos de 4% da frota, são responsáveis por 45% da demanda energética e por metade das emissões do setor.

O prognóstico sobre o crescimento sustentável do país depende de qual modelo de desenvolvimento o governo pretende implantar. Embora, por enquanto, tenha sido demonstrado engajamento nas políticas de uso intensivo de carbono, o que pode comprometer programas em andamento e compromissos ambientais.

Em uma visão com o uso estratégico de energia para o setor, a partir de 2021, as emissões de CO₂e poderiam ser reduzidas em 20% até 2030 e 53% até 2050 se comparadas ao cenário tendencial. Nessa linha, espera-se uma redução da intensidade de carbono para 2050 de 71% para o transporte de passageiros e 61% para o transporte de carga.

Por outro lado, caso as medidas adicionais não forem consideradas (no cenário tendencial), poderá haver aumento de até 73% das emissões em relação as emissões de 2005. Isso implica que o Brasil tem o potencial de atingir as metas de mitigação discutidas no Acordo de Paris da UNFCCC, dependendo de qual modelo seguir.

Ressalta-se que, para alcançar ou até mesmo superar as estimativas do CDS, é fundamental que o Brasil desenvolva diretrizes que estabeleçam um planejamento claro, com objetivos e marcos temporais a serem monitorados, do uso estratégico de energia no setor de transportes, facilitando uma transição justa para uma mobilidade de baixo carbono, garantindo, também, a segurança energética durante e após esse processo.

Como pretensões para o desenvolvimento de futuros estudos, sugere-se a criação da categoria de caminhões extrapesados e a divisão dos automóveis em motorização (por exemplo, 1.0 a 1.5; 1.6 a 2.0 e acima de 2.0). Ademais, sugere-se que as associações de fabricantes de veículos automotores (por exemplo, ANFAVEA e ABRACICLO) especifiquem em seus dados de vendas os veículos elétricos e híbridos separadamente, tanto para veículos leves como pesados.

Ainda, em pesquisas futuras, recomenda-se buscar e estimar novos indicadores e criar *benchmark* para avaliar o potencial de cada indicador, ponderando o quão distante o país está para o atingimento da NDC ou mesmo comparando com o desempenho de outros países. Essas melhorias contribuiriam para uma melhor compreensão das estratégias de mitigação de longo prazo.

Nessa linha, sugere-se também estudos que avaliem os benefícios potenciais das opções de mitigação em períodos mais longos (por exemplo, 2100), pois algumas políticas produzem efeitos que só serão percebidos efetivamente dentro de algumas décadas.

Por fim, recomenda-se a consideração de GEE indiretos e poluentes atmosféricos como Monóxido de Carbono (CO), Óxidos de Nitrogênio (NO_x), Compostos Orgânicos Voláteis (VOC) e Dióxido de Enxofre (SO₂), e a consideração de poluentes locais como o material matriculado com diâmetro aerodinâmico de até 10 micrometros (MP10) e de até 2,5 micrometros (MP2,5). Além disso, análises da participação de cada entidade subnacional nas emissões nacionais auxiliariam no processo de transição energética e de carbono.

Como implicação para a comunidade, apesar do TEMA ser aplicado apenas no contexto brasileiro, este pode ser empregado em diversos contextos, variando somente na escolha das abordagens para cada modo, sendo definida(s) a partir da disponibilidade de dados do local de estudo (*tier*).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEIFA - Associação Brasileira das Empresas Importadoras e Fabricantes de Veículos Automotores (2021). Estatísticas – Emplacamento de veículos pelas associadas à ABEIFA. Disponível em: <http://www.abeifa.com/mercado>.
- ALLEN, M. R., BARROS, V. R., BROOME, J., CRAMER, W., CHRIST, R., CHURCH, J. A., EDENHOFER, O. IPCC fifth assessment synthesis report-climate change 2014 synthesis report, 2014.
- ALMEIDA, I. R. P., DA COSTA, M. G., GONÇALVES, D. N. S., D'AGOSTO, M. A. Análise do momento de transporte rodoviário de carga no Brasil de 1970 a 2016. Anais do XXXI Congresso Nacional de Pesquisa em Transportes da ANPET. Recife/PE, 2017. Disponível em: http://146.164.5.73:30080/tempsite/anais/documentos/2017/Gestao%20de%20Transportes/Gestao%20do%20Transporte%20de%20Carga/5_319_AC.pdf
- ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil. Empresas nacionais de transporte aéreo regular de âmbito nacional, 1998. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-de-transporte-aereo/anuario-do-transporte-aereo/dados-do-anuario-do-transporte-aereo>
- ANAC. ANUÁRIO DO TRANSPORTE AÉREO. Brasília, DF, 1999. Obtido de <https://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-de-transporte-aereo/anuario-do-transporte-aereo/dados-do-anuario-do-transporte-aereo>
- ANAC. (2012) Seminário sobre os 10 anos de liberdade tarifária no transporte aéreo doméstico. Brasília, DF, 2012.
- ANAC. Transporte aéreo no Brasil: preço e qualidade. Brasília, DF, 2013.
- ANAC. Plano de Ação para a Redução das Emissões de Gases de Efeito Estufa da Aviação Civil Brasileira. Brasília, DF, 2015.
- ANAC. Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil – 2019, ano base 2018. Brasília/DF 2019.
- ANAC. Dados e Estatísticas – Consulta Interativa, 2021 Disponível em: < <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-de-transporte-aereo/consulta-interativa>>. Acessado em setembro de 2021.
- ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2020). Anuário Estatístico. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2020>
- ANP trilhos - Associação Nacional dos Transportadores de Passageiros sobre Trilhos (2021). Balanço do Setor Metroferroviário. Disponível em: <https://anptrilhos.org.br/balanco-do-setor-metroferroviario-brasileiro-2020-2021/>.
- ANP trilhos (2020). Contato direto realizado em 6 de novembro de 2020.
- ANTAQ - Agência Nacional de Transportes Aquaviários (2021). Estatístico Aquaviário 2.1.4. Disponível em: <http://ea.antaq.gov.br/QvAJAXZfc/opensoc.htm?document=painel%5Cantaq%20-%20anu%20C3%A1rio%202014%20-%20v0.9.3.qvw&lang=pt-BR&host=QVS%40graneleiro&anonymous=true>
- ANTAQ - Agência Nacional de Transportes Aquaviários. TKU da Navegação Interior, de Cabotagem e Longo Curso em Vias Interiores – 2019, 2020. Brasília, DF. Disponível em: <http://sophia.antaq.gov.br/terminal/acervo/detalhe/28203?guid=4962bc8f8406b4ededfa&returnUrl=%2Fterminal%2Fresultado%2Flistar%3Fguid%3D4962bc8f8406b4ededfa%26quantidadePaginas%3D2%26codigoRegistro%3D28203%2328203&i=24>

- ANTAQ - Agência Nacional de Transportes Aquaviários (2018). Caracterização da oferta e da demanda do transporte fluvial de passageiros e cargas na região amazônica. Belém. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/328930090_CHARACTERIZACAO_DA_OFERTA_E_DA_DEMANDA_DO_TRANSPORTE_FLUVIAL_DE_PASSAGEIROS_E_CARGAS_NA_REGIÃO_AMAZONICA
- ANTAQ - Agência Nacional de Transportes Aquaviários (2013). Caracterização da oferta e da demanda do transporte fluvial de passageiros na região amazônica. Brasília. Disponível em: <https://www2.mppa.mp.br/sistemas/gcsubsites/upload/41/transportepassageiros.pdf>
- ANTP – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS. Sistema de informações da mobilidade urbana: relatório geral 2016. São Paulo: ANTP, 2018. Disponível em: <http://www.antp.org.br/relatorios-a-partir-de-2014-nova-metodologia.html>.
- ANTP – Associação Nacional de Transportes Públicos (2018). Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da ANTP-SIMOB – Relatório geral 2016. Disponível em: <http://files.antp.org.br/simob/simob-2016-v6.pdf>
- ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres. Anuário do Setor Ferroviário, 2012. Disponível em: <https://portal.antt.gov.br/anuario-do-setor-ferroviario>.
- ANTT. Evolução do transporte ferroviário de cargas. Brasília, DF, 2021. Obtido de http://www.antt.gov.br/ferrovias/arquivos/Evolucao_do_Transporte_Ferroviario.html
- ASHINA, S., FUJINO, J., MASUI, T., EHARA, T., HIBINO, G. A roadmap towards low-carbon society in Japan using backcasting methodology: Feasible pathways for achieving an 80% reduction in CO₂ emissions by 2050. *Energy Policy*, 41, pp. 584–598, 2012.
- AZAM, M., OTHMAN, J., BEGUM, R. A., ABDULLAH, S. M. S., NOR, G. M. Energy consumption and emission projection for the road transport sector in Malaysia: an application of the LEAP model. *Environment, Development and Sustainability* ,8, pp.1027–1047, 2016.
- BARTHOLOMEU, D. B., E FILHO, J. V. C. (2008) Impactos econômicos e ambientais decorrentes do estado de conservação das rodovias brasileiras: um estudo de caso. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 46(3), 703–738. doi:10.1590/S0103-20032008000300006
- BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Panorama do setor automotivo: as mudanças estruturais da indústria e as perspectivas para o Brasil. Brasília/DF, 2008
- BP. (2018). Energy Outlook 2018. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2018.pdf>.
- CALIL SALLUM, A. M.; GARCIA, D. M.; SANCHES, M.. Dor aguda e crônica: revisão narrativa da literatura. *Acta Paulista de Enfermagem*, v. 25, n. 1, 2012.
- CCR Barcas. Contato direto realizado em 1 de dezembro de 2019.
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2019). Emissões veiculares no estado de São Paulo. São Paulo, SP. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/>
- CLAPP, C., PRAG, A., 2012. Projecting Emissions Baselines for National Climate Policy.
- CNT - Confederação Nacional do Transporte (2016). Transporte metroferroviário de passageiros. Brasília/DF. Disponível em: <https://cnt.org.br/transporte-metroferroviario-de-passageiros>.
- CNT. (2015) Transporte Aéreo de Passageiros. Brasília/DF, 2015.
- CNT. (2017) Transporte Rodoviário - Desempenho do setor, infraestrutura e investimentos. Brasília, DF.

- CNT – Confederação Nacional do Transporte. O transporte move o Brasil: proposta da CNT aos candidatos – Brasília: CNT, 2018. Disponível em: <https://repositorio.itl.org.br/>. Acesso em 03 de março de 2022.
- CLIMATE WATCH. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>. Acesso em: 01/02/22.
- COLLINS, John A.; FAUSER, Bart CJM. Balancing the strengths of systematic and narrative reviews. 2005.
- COOK, D.J., MULROW, C.D. e HAYNES, R.B. “Systematic reviews: synthesis of best evidence for clinical decisions”, *Annals of Internal Medicine* v.126, n.5, pp. 376-380, 1997.
- COSTA, M. G. Análise da Intensidade de Carbono no Transporte Rodoviário no Brasil. Dissertação de mestrado. Programa de Engenharia de Transportes da COPPE/UFRJ, 2019. Disponível em: <<https://www.pet.coppe.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes/2019/330-rocedimento-para-definicao-de-politicas-de-manutencao-de-via-permanente-ferroviaria-3>>
- DAUDT, G., WILLCOX, L. D. Visão 2035: Brasil, país desenvolvido – Agendas setoriais para o desenvolvimento. Capítulo da Indústria Automotiva. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 1ª ed, Rio de Janeiro-RJ, 2018 Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/16241/1/PRCapLiv214167_industria_automotiva_compl_P.pdf.
- D’AGOSTO, M. A., RIBEIRO, S. K. (2004). Eco-efficiency management program (EEMP)—a model for road fleet operation. *Transportation Research Part D* 9 497–511.
- D’AGOSTO, M. A., RIBEIRO, S. K. (2009). Assessing total and renewable energy in Brazilian automotive fuels. A life cycle inventory (LCI) approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 1326–1337.
- DANTAS, G., SICILIANO, B., FREITAS, L., DE SEIXAS, E. G., DA SILVA, C.M., & ARBILLA, G. Por que os níveis de ozônio permaneceram altos no Rio de Janeiro durante a greve dos caminhoneiros brasileiros? *Pesquisa de Poluição Atmosférica*, 2019.
- Data.rio. Instituto Pereira Passos. SIURB. Prefeitura do Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.data.rio/>. Acessado em setembro de 2021.
- DAVIS, STACY C.; SUSAN W. DIEGEL, ROBERT G. BOUNDY (2009). *Transportation Energy Data Book: Edition 28*. US Department of Energy. ORNL-6984 (Edition 28 of ORNL-5198). <http://cta.ornl.gov/data/Index.shtml>.
- DEDINEC, A., MARKOVSKA, N., TESESKA, V., DUIC, N., KANENVCE, G. Assessment of climate change mitigation potential of the Macedonian transport sector. *Energy*, 57, pp.177-187, 2013
- DHL, Delivering tomorrow – Logistics 2050, a scenario study. Deutsche Post AG, Bonn, Germany, 2012.
- DNIT. (2015) Histórico Ferroviário. Obtido 16 de junho de 2019, de <https://189.9.128.64/ferrovias/historico/historico>
- EEA – European Environment Agency, 2018. European Union Emission Inventory Report 1990-2016.
- EIA, Energy Information Administration. International Energy Outlook 2021. <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/tables_side_xls.php>. Acesso em: 02/02/22.
- EICHHORST, U., BONGARDT, D. MobiliseYourCity - Monitoring & reporting approach for GHG emissions. *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)*, 2017.
- EISENHARDT, Kathleen M. Building theories from case study research. *Academy of management review*, v. 14, n. 4, p. 532-550, 1989.

- EPA – US Environmental Protection Agency, 2018. Inventory of US Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2016
- EPE, Estudo Associado ao Plano Decenal de Energia – PDE 2021. Consolidação de Bases de Dados do Setor de Transporte: 1970-2010. In: Nota técnica SDB-Abst 1/12012, Ministério de Minas e Energia, Brasil, 2012.
- EPE, Plano Nacional de Energia – 2050. Ministério de Minas e Energia, Brasil, 2016.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética, Balanço Energético Nacional – 2021. Ano Base 2020, Ministério de Minas e Energia, DF, Brasil, 2021.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Plano Nacional de Energia 2050 – Versão para Consulta Pública; 2020. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/>. Acesso em 26 de setembro de 2021.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Plano de Expansão Energética de 10 anos 2031, Ministério de Minas e Energia, DF, Brasil, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em 26 de março de 2022.
- EPHRAUMS, J. J., & JENKINS, G. J. J. Climate change. Cambridge University Press, 1992.
- EPL – Empresa de Planejamento e Logística S.A. Observatório Nacional de Transporte e Logística, 2020. Disponível em: <https://ontl.epl.gov.br/explore-dados/consultas-a-base-de-dados/>
- EPL – Empresa de Planejamento e Logística S.A. Anuário Estatístico de Transportes 2010-2020. 2021a Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/dados-de-transportes/AnuarioEstatisticodeTransportes2020QRcode21.06.2020.pdf>
- EPL – Empresa de Planejamento e Logística S.A. Plano Nacional de Logística – PNL 2035. 2021b Disponível em: <https://ontl.epl.gov.br/planejamento/>
- FAÇANHA, C., BLUMBERG, K., MILLER, J., 2012. Global Transportation Energy and Climate. The International Council on Clean Transportation (ICCT).
- FENABRAVE - Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores (2021). Índices e Números – emplacamentos novos. São Paulo/SP. Disponível em: <http://www.fenabrave.org.br/Portal/conteudo/emplacamentos>.
- FREITAS, W. R. S. e JABBOUR, C. J. C. “Utilizando estudo de caso(s) como estratégia de pesquisa qualitativa: boas práticas e sugestões”, *Estudo&Debate* v. 18, n. 2, pp. 07-22, 2011.
- GEIPOT - Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (2001). Estatísticas de Transportes: Banco de Dados. Empresa Brasileira de Planejamento de Transporte, Disponível em <http://www.geipot.gov.br/>.
- GERHARDT, T. E., SILVEIRA, D. T. Métodos de pesquisa. Plageder, 2009.
- GIGERENZER, Gerd; SELTEN, Reinhard (Ed.). Bounded rationality: The adaptive toolbox. MIT press, 2002.
- GIL, A. C., Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo, Atlas, 2008.
- GOES, G. V. Entrada de meio alternativos de transporte urbano: histórico e perspectivas futuras. Nota Técnica nº 66, Diset – Diretoria de Estudos e Políticas Setoriais de Inovação e Infraestrutura DO Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2020. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/10053/1/NT_66_Diset_%20Entrada%20de%20meio%20alternativos%20de%20transporte%20urbano.pdf

- GOES, G. V.; BERTONCINI, Bruno Vieira. Modelo de estimação de custos do transporte urbano de cargas com base na vulnerabilidade da rede viária. *Journal of Transport Literature*, v. 10, n. 2, p. 30-34, 2016.
- GOES, G.V.; GONÇALVES, D. N. S.; D'AGOSTO, M. A.; ARALDI, F. Why electric mobility should be treated as the main instrument of transport climate policy in the next rounds of the Brazilian NDC. Policy Brief. Climate Transparency, 2022. Disponível em: <https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2022/03/Policy-Brief-Transport-in-Brazil.pdf>
- GOLDENSTEIN, L. (1998) Repesando a dependência após o Plano Real. *SciELO*, 12(33), 131–135.
- GONÇALVES, D. N. S., GOES, G. V., MÁRCIO DE ALMEIDA, D. A., BANDEIRA, R. A. M. Energy use and emissions scenarios for transport to gauge progress toward national commitments. *Energy Policy*, 135, 110997, 2019a.
- GONÇALVES D. N. S.; GOES, G. V.; D'AGOSTO, M. de A. Transportes no Brasil – Panorama e Cenários prospectivos para atendimento da contribuição nacionalmente determinada. Relatório de Referência. 1ª ed, *Instituto Brasileiro de Transporte Sustentável (IBTS)*, Rio de Janeiro, 2019b.
- GONÇALVES, D. N. S.; D'AGOSTO, M. de A. Future prospective scenarios for the use of energy in transportation in Brazil and GHG emissions, Business as Usual (BAU) scenario – 2050, Final Report. 1ª ed, *Instituto Brasileiro de Transporte Sustentável (IBTS)*, Rio de Janeiro, 2017.
- GONÇALVES, D. N. S., GOES, G. V., MÁRCIO DE ALMEIDA, D. A (2020). Energy transition in Brazil: Paris Agreement compatible scenario for the transport sector up to 2050. Climate Transparency. Disponível em: <https://www.climate-transparency.org/>.
- GONZALEZ, L. R., BOLONIO, D., MAZADIEGO, L. F., NARANJOO-SILVA, S., ESCOBAR-SEGOVIA, K. Long-Term Forecast of Energy and Fuels Demand Towards a Sustainable Road Transport Sector in Ecuador (2016–2035): A LEAP Model Application. *Sustaibability*, 2020.
- GOTA, S., HUIZENGA, C., PEET, K. E KAAR, G. Intended Nationally-Determined Contributions (INDCs) offer opportunities for ambitious Actions on Transport and Climate Change. *Partnership on Sustainable Low Carbon Transport – PPMC*, 2015.
- HAN, J., HAYASHI, Y. Assessment of private car stock and its environmental impacts in China from 2000 to 2020. *Transportation Research Part D*, 13, pp. 471–478, 2008.
- HART, A., Knowledge Acquisition for Expert Systems. 2 ed. London, Kogan Page, 1989.
- HAY, W. W. (1961). An Introduction to Transportation Engineering. John Wiley & Sons.
- HOOPER, T., AUSTEN, M.C., BEAUMONT, N., HEPTONSTALL, P., HOLLAND, R.A., KETSOPOULOU, I., WINSKEL, M., 2018. Do energy scenarios pay sufficient attention to the environment? Lessons from the UK to support improved policy outcomes. *Energy Policy* 115, 397–408, 2018.
- HUGHES, P. (1994) Planning for reduced carbon dioxide emissions from transport sources. *Transportation Planning Systems*, v. 2, no 1, p.29-40.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Brasil em Números, Volume 27, Rio de Janeiro, 2019.
- IBGE. Projeção da população, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/> Acessado em 25 de fevereiro de 2021.
- IEA - International Energy Agency. Key World Energy Statistics., Paris, France, 2013.

- IEA. Tracking Clean Energy Progress - Energy Technology Perspectives, Excerpt Informing Energy Sector Transformations. Paris, France, 2017a.
- IEA. CO₂ emissions from fuel combustion – Overview. Paris, France, 2017b.
- IEA. Global Energy Review 2021. Disponível em: <<https://iea.org>> Acesso em: 03/01/2022
- IEA. Global EV Outlook 2020 - Entering the decade of electric drive? 2020. Disponível em: https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdfactualites/Global_EV_Outlook_2020.pdf
- IEA. Net Zero by 2050. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>. IEA, Paris (2021a)
- IEA. Mobility Model. OECD/IEA, Paris (2021b). Disponível em: <https://www.iea.org/areas-of-work/programmes-and-partnerships/the-iea-mobility-model>
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change - Climate Change. Second Assessment - Climate Change, 1995.
- IPCC. Working Group III: Mitigation, 2001.
- IPCC. Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press, 2018
- IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, 2021.
- IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926, 2022
- IPEA. (2010) GARGALOS E DEMANDAS DA INFRAESTRUTURA FERROVIÁRIA E OS INVESTIMENTOS DO PAC: MAPEAMENTO IPEA DE OBRAS FERROVIÁRIAS. Rio de Janeiro.
- ITF – International Transport Forum. Transport CO₂ and the Paris Climate Agreement: Where Are We Six Years Later? Paris, 2021
- JABER, J. O., AL-GHANDOOR, A. M., AL-HINTI, I., SAWALHA, S. A. Prediction of energy consumption of passenger transportation and GHG emissions in Jordan. *Int. J. Global Warming*, Vol. 4, No. 2, 2012.
- KAY, A., NOLAND, R. B., RODIER, C. J. Achieving reductions in greenhouse gases in the US road transportation sector. *Energy Policy*, 69, pp. 536–545, 2014.
- KLAVS, G., Rekis., J. Introduction of energy and climate mitigation policy issues in energy - environment model of Latvia. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 6, 2016.

- KLOESS, M., MULLER, A. Simulating the impact of policy, energy prices and technological progress on the passenger car fleet in Austria—A model based analysis 2010–2050. *Energy Policy*. 39, 5045-5062, 2011.
- KORKMAZ, E., AKGUNGOR, A. P. Flower pollination algorithm approach for the transportation energy demand estimation in Turkey: model development and application, *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 13:11-12, 429-447, DOI:10.1080/15567249.2019.1572835
- LA ROVERE, E. L.; WILLS, W.; DUBEUX, C. B. S; PEREIRA JR, A. O.; D'AGOSTO, M. A; WALTER, M. K. C; GROTTA, C.; CASTRO, G.; GONÇALVES, D. N. S.; HEBEDA, O.; LOUREIRO, S. M.; OBERLING, D; GESTEIRA, C.; GOES, G.V.; ZICARELLI, I.F.; E OLIVEIRA, T.J.P. Implicações Econômicas e Sociais dos Cenários de Mitigação de GEE no Brasil até 2050: Projeto IES-Brasil, Cenário 1.5 ° C. COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.
- LA ROVERE E., DUBEUX C., WILLS W. WALTER, K. C., NASPOLINI, G. HEBEDA O., GONÇALVES D. N. S., GOES, G. V., D'AGOSTO M. A., NOGUEIRA E. C., CUNHA H. F., GESTEIRA C., TREUT G., CAVALCANTI G., BERMANZON M. Policy lessons on deep decarbonization in large emerging economies, 2021. Disponível em: <<https://www.iddri.org/en/publications-and-events/report/policy-lessons-deep-decarbonization-large-emerging-economies>>
- LEFÈVRE, J., WILLS, W., HOURCADE, J.-C. Combining low-carbon economic development and oil exploration in Brazil? An energy–economy assessment. *Climate Policy* 18, 1286–1295, 2018.
- LEIP, A., SKIBA, U., VERMEULEN, A., THOMPSON, R.L., 2018. A complete rethink is needed on how greenhouse gas emissions are quantified for national reporting. *Atmos. Environ.* 174, 237–240.
- LEFÈVRE, J., BRIAND, Y., PYE, S., TOVILLA, J., LI, F., OSHIHO, K., A pathway design framework for sectoral deep decarbonization: the case of passenger transportation. *Climate Policy*, Vol 1, 2020.
- LIIMATAINEN, H., KALLIONPAA, E., POLLANEN, M., STENHOLM, P. TAPIO, P., MCKINNON, A. Decarbonizing road freight in the future — Detailed scenarios of the carbon emissions of Finnish road freight transport in 2030 using a Delphi method approach. *Technological Forecasting & Social Change*, 81, pp. 177–191, 2014.
- LLIANO, C., PÉREZ-BALSALOBRE, S., OÉREZ-GARCIA, J. Greenhouse Gas Emissions from Intra-National Freight Transport: Measurement and Scenarios for Greater Sustainability in Spain. *Sustainability*, 2018.
- LLOYD'S. Lloyd's emerging risk report 2022. Shifting powers: Climate cooperation, chaos or competition? Managing geopolitical risk from the climate transition. University of Cambridge, 2022
- MCKINSEY & COMPANY (2010). Estudo do Setor de Transporte Aéreo do Brasil: Relatório Consolidado. BNDES, Rio de Janeiro- RJ. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/7666/2/Estudo%20do%20setor%20de%20transporte%20a%20aereo%20do%20Brasil_jan.2010_final_P_BD.pdf
- MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. 3ª Comunicação Nacional do Brasil à convenção-quadro das nações unidas sobre Mudança do Clima – Volume III, Brasília, 2016. Disponível em: <http://sirene.mcti.gov.br/documents/1686653/1706739/Volume+3.pdf/355d4a1e-9f3c-474a-982e-b4a63312813b>.
- MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. 4ª Comunicação Nacional do Brasil à convenção-quadro das nações unidas sobre Mudança do Clima – Brasília, 2020. Disponível em: https://issuu.com/mctic/docs/quarta_comunicacao_nacional_brasil_unfccc.
- MINFRA – Ministério da Infraestrutura. Frota de veículos 2021. Brasília/DF, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-denatran/frota-de-veiculos-2021>

- MMA – Ministério do Meio Ambiente. Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013: Ano-base 2012, DF, 2013.
- MME - Ministério de Minas e Energia (2019). Relatório de consolidação dos testes e ensaios para validação da utilização do Biodiesel B15 em motores e veículos. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/>. Acesso em 01 de fevereiro de 2021.
- MORLOK, E. K (1978). Introduction to Transportation Engineering and Planning. McGraw-Hill College.
- MTPA- Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. Anuário Estatístico de Transportes 2010 – 2017. Brasília/DF, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/anuario-estatistico-transportes-2010-2017-pdf>
- NOGUEIRA, E. M., YANAI, A. M., DE VASCONCELOS, S. S., DE ALENCASTRO GRAÇA, P. M. L., & Fearnside, P. M. Carbon stocks and losses to deforestation in protected areas in Brazilian Amazonia. *Regional Environmental Change*, 18(1), 261-270, 2018.
- NRC – National Research Council (2010). Technologies and Approaches to Reducing the Fuel Consumption of Medium and Heavy-Duty Vehicles, Washington, DC.
- NTC & Logística - Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística (2019). Base de dados. Disponível em: <https://www.portalntc.org.br/login>
- NTU – Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos. Anuário. Disponível em: <<https://www.ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub636687203994198126.pdf>>. Acesso em 08/01/2019, 2018.
- OLIVEIRA, C. M. Procedimentos para identificação, análise e recomendação de boas práticas para o transporte de cargas. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.
- OLIVEIRA, C. M.; BANDEIRA, R. A. M.; GOES, Gg. V.; GONÇALVES, D. N. S.; D'AGOSTO, M. A. Sustainable Vehicles-Based Alternatives in Last Mile Distribution of Urban Freight Transport: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, v. 9, p. 1324, 2017.
- O'NEIL, CATHY AND, SCHUTT, RACHEL (2013). Doing Data Science. O'Reilly. ISBN 978-1-449-35865-5.
- PBEV - Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (2021). Dados dos veículos leves aprovados no Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) autorizados a ostentar a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE). Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/veiculos-automotivos-pbe-veicular>
- PECORA, Peter J. *et al.* What works in foster care?: Key components of success from the northwest foster care alumni study. Oxford University Press, 2009.
- PENMAN, J.; GYTASKY, M.; HIRAISHI, T.; IRVING, W; KRUG, T.. Guidelines for National greenhouse gas inventories – overview. IPCC, 2006.
- PEREIRA FILHO, P.E.B. (2022). Empregos verdes no Brasil: onde estão e quantos são? Instituto Escolha, nº 7, *Policy Brief*. Disponível em < https://www.escolhas.org/wp-content/uploads/PB_07_Paulo-Braga_empregos-verdes.pdf> Data último acesso: 17/04/2022.
- PETROBRAS. Caderno de mudança do clima, 2020. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/pt/sociedade-e-meio-ambiente/meio-ambiente/mudancas-do-clima/>>
- PIETZCKER, R. C.; LONGDEN, T.; CHEN, W.; FU, S.; KRIEGLER, E.; KYLE, P.; LUDERER, G. Long-term transport energy demand and climate policy: Alternative visions on transport decarbonization in energy-economy models. *Energy*, 64, pp. 95-108, 2014

- PIO, M., Estudos Prospectivos como Ferramenta de Apoio ao Planejamento. Caso do Setor Têxtil Nacional. Exame de Qualificação, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.
- PLVB – Programa de Logística Verde Brasil do Instituto Brasileiro de Transporte Sustentável (IBTS). Contato direto realizado em março de 2019.
- PONGTHANAISAWAN, J., SORAPIPATANA, C. Greenhouse gas emissions from Thailand’s transport sector: Trends and mitigation options. *Applied Energy*, 101, pp. 288–298, 2013.
- PRATES *et al.*. Climate and Development: Visions for Brazil 2030, 2021. Disponível em: www.climaesociedade.org.
- ROBINSON, J.B.. Energy backcasting a proposed method of policy analysis. *Energy Policy* 10,337–344, 1982
- ROWLEY, J. e SLACK, F. “Conducting a literature review”, *Management Research News* v.27, n.6, pp. 31-39, 2004.
- SAIKAWA, E., KIM, H., ZHONG, M., AVRAMOV, A., ZHAO, Y., JANSSENS-MAENHOUT, G., HOROWITZ, L.W., 2017. Comparison of emissions inventories of anthropogenic air pollutants and greenhouse gases in China. *Atmos. Chem. Phys.* 17 (10), 6393–6421
- SÁ-SILVA, J. R.; DE ALMEIDA, C. D.; GUINDANI, J. F. Pesquisa documental: pistas teóricas e metodológicas. *Revista brasileira de história & ciências sociais*, v. 1, n. 1, 2009.
- SCHÄFER, A.; JACOBY, H. D. Experiments with a hybrid CGE-MARKAL model. *The Energy Journal*, PP.171-177, 2006.
- SCHIPPER, L., MARIE-LILLIU, C., GORHAM, R. Flexing the Link between Carbon Emissions and Transport. World Bank Environment Division, 2000.
- SILVA JUNIOR, C., ARAGÃO, L., FONSECA, M., ALMEIDA, C., VEDOVATO, L., & ANDERSON, L. Deforestation-Induced Fragmentation Increases Forest Fire Occurrence in Central Brazilian Amazonia. *Forests*, 9(6), 305, 2018.
- SIMS, R., SCHAEFFER, R., CREUTZIG, F. et al, Transport. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.
- SINDIPEÇAS - Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores. 2009. Credidio, J. & Serra, B. Estudo da frota circulante brasileira – Sindicato Nacional de Industria de Componentes para Veículos Automotores.
- SLoCAT- Partnership on Sustainable Low Carbon Transport. SLoCAT database on climate methodologies and tools in transport. Version – April 2017, 2017.
- SOLOMON, S.; QIN, D., MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp, 2007.
- SOUSA-NETO, E. R., GOMES, L., NASCIMENTO, N., PACHECO, F., & OMETTO, J. P. Land use and land cover transition in Brazil and their effects on greenhouse gas emissions. In *Soil management and climate change* (pp. 309-321), 2018.
- THOMÉ, A.M., SCAVARDA, L. F. e SCAVARDA, A.J. “Conducting systematic literature review in operations management.” *Production Planning & Control*, 2016. DOI: 10.1080/09537287.2015.1129464.

- TOB-OGU, ABIYE *et al.* Sustainability intervention mechanisms for managing road freight transport externalities: A systematic literature review. *Sustainability*, v. 10, n. 6, 2018.
- TRAD, L. Grupos focais: conceitos, procedimentos e reflexões baseadas em experiências com o uso da técnica em pesquisas de saúde. *Revista de Saúde Coletiva*, v. 19, n. 3, 2009.
- TRAIL, M. A., TSIMPIDI, A. P., LIU, P., TSIGARIDIS, K., HU, Y., RUDOKAS, J. R., MILLER, P. J., NENES, A., RUSSELL, A. G. Impacts of Potential CO₂-Reduction Policies on Air Quality in the United States. *Environmental Science & Technology*. 2015.
- TRANFIELD, D., DENYER, D. e SMART, P. “Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review”, *British Journal of Management* v.14, pp. 207-222, 2003.
- TRAVESSET-BARO, O., GALLACHÓIR, B. P. Ó., JOVER, E., ROSAS-CASALS, M. Transport energy demand in Andorra. Assessing private car futures through sensitivity and scenario analysis. *Energy Policy*, 96, pp. 78–92, 2016.
- ULLAH, AMM Sharif. A Fuzzy Monte Carlo Simulation technique for sustainable society scenario (3S) simulator. In: Sustainability Through Innovation in Product Life Cycle Design. *Springer*, Singapore, 2017. p. 601-618.
- UNITED NATIONS. Population Division – World Urbanization Prospects, the 2014 revision. Department of Economic and Social Affairs, 2014.
- UNTERSTELL, N., MARTINS, N. NDC do Brasil: Avaliação da atualização submetida à UNFCCC em 2022. Nota Técnica. Rio de Janeiro, Brasil, TALANOA, 2022. Disponível em: <www.institutotalanoa.org/documentos> Acesso em: 25/04/22.
- VALENTIM, M. L. P., Métodos qualitativos de pesquisa em Ciência da Informação. São Paulo, Polis, 2005.
- VANEK, F.; ANGENENT, L.; BANKS, J.; DAZIANO, R.; TURNQUIST, M. 1st Edition. Sustainable Transportation Systems Engineering: Evaluation & Implementation. Mac Graw Hill Education, 2014.
- VIEWEG, M., 2017. Bottom-up GHG inventory and MRV of measures. Available at: http://transferproject.org/wp-content/uploads/2017/05/Transport-GHG-Inventory-andMRV-of-measures_Paper_Vieweg_2017.pdf, Accessed date: 20 April 2019.
- VOSS, C., TSIKRIKTSIS, N. e FROHLICH, M. Case research in operations management, *International Journal Of Operations & Production Management* v. 22, n. 2, pp. 195-219, 2002.
- WANG, Xu et al. Capacity Estimation for Weaving Segments Using a Lane-Changing Model. Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, n. 2461, p. 94-102, 2014.
- WEF – World Economic Forum. The Global Risks Report 2022 – Insight Report. 17th Edition, 2022.
- WEN, Z., ZHANG, X., CHEN, J., TAN, Q., ZHANG, X. Forecasting CO₂ Mitigation and policy options for Chinas’s key sectors in 2010-2030. *Energy & Environment*. Vol. 25, No. 3&4, 2014.
- WHO – World Health Organization – Disponível em: <http://www.who.int/en/>, 2018.
- YIN, R. K. Case study research design and methods third edition. *Applied social research methods series*, v. 5, 2003.
- YIN, R. K. Qualitative Research from Start to Finish. The Guilford Press, New York, 2011.

YU, J., SHAO, C., XUE, C., HU, H. China's aircraft-related CO₂ emissions: Decomposition analysis, decoupling status, and future trends. *Energy Policy*. V. 138, 2020.

APÊNDICE I – ORGANIZAÇÃO DE EVENTOS RELACIONADOS AO TEMA DE PESQUISA

O I *Workshop* Revolução Energética – Cenários para os transportes no Brasil em 2050 foi realizado no dia 04 de novembro de 2015, na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Tal atividade contou com a participação de mais de 60% do público esperado (26 participantes), todos com experiência notoriamente reconhecida na área de transporte, mobilidade e energia, com trabalhos já publicados sobre a temática e pertencentes a instituições que também atuam no tema. Dentre elas, destacam-se: o Greenpeace, a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), o Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), o Instituto de Políticas de Transporte & Desenvolvimento (ITDP), o *World Resources Institute* (WRI), entre outras. Estiveram presentes também, representantes da COPPE e da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte (ANPET). Além disso, o Governo Federal enviou um representante do Ministério das Cidades.

O evento se constituiu de uma mesa redonda onde, para debater com o grupo de especialistas as premissas que deveriam ser adotadas para estabelecimento de diferentes cenários para a matriz energética para os transportes, no Brasil, até o ano de 2050, considerando o crescimento da demanda de energia e as consequentes emissões de CO₂.

A partir de então, apresentou-se o primeiro rascunho do método e as ferramentas a serem adotadas para modelar e prever os cenários futuros de transporte. Adicionalmente o encontro objetivou: (1) ratificar a forma de pensar o problema e as soluções para o transporte no Brasil; (2) ratificar a modelagem adotada para previsão dos cenários; (3) ratificar a escolha das premissas qualitativas adotadas; (4) ratificar a escolha das

premissas quantitativas adotadas; (5) identificar os envolvidos que gostariam de acompanhar o projeto/iniciativa; e (6) estabelecer a dinâmica de encontros futuros.

O II *Workshop* Revolução Energética – cenários para os transportes no Brasil em 2050 foi realizado no dia 13 de setembro de 2016, na UFRJ. O evento contou com a participação de mais de 73% do público esperado (54 participantes), todos com experiência notoriamente reconhecida na área de transporte, mobilidade e energia, com trabalhos já publicados sobre a temática e pertencentes a empresas que também atuam no tema. Dentre elas, destacam-se: o Greenpeace, ANP, EPE, ANAC, IEMA, ITDP, WRI, entre outras.

Estiveram presentes também, representantes da COPPE/UFRJ, da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e da ANPET. Novamente, o Governo Federal enviou um representante do Ministério das Cidades.

Na parte da manhã foram apresentados os dois cenários prospectivos de uso de energia e para emissões de GEE do setor de transportes, no Brasil, até o ano de 2050, considerando o crescimento da demanda de energia e as consequentes emissões de CO₂. Apresentaram-se todas as premissas estabelecidas bem como as ferramentas e os métodos adotados.

Na parte da tarde, constituíram-se dois painéis de discussão. O painel 1, teve como tema “Transporte” foi mediado pelo Professor Marcio de Almeida D’Agosto e contou com a participação dos seguintes debatedores: (1) Alexandre Szklo, professor do PPE/COPPE/UFRJ; (2) Jurandi Arruda, representante do Instituto de Transporte e Logística (ITL) da Confederação Nacional dos Transportes (CNT) e (3) José Carlos Tigre (ANP). Assim, foram discutidos os resultados dos dois cenários modelados, bem como o seu alcance e as suas limitações. Como resultado, ficou estabelecido que esta linha de

pesquisa deveria ter investimentos contínuos e novos trabalhos com este perfil deveriam ser considerados.

O painel 2, cujo tema abordado foi “Planejamento Energético” foi mediado pelo Professor Gilberto Jannuzzi da UNICAMP e contou com a participação dos seguintes debatedores:

(1) Roberto Kishinami do Instituto Clima e Sociedade (iCS), Luiz Augusto Horta Nogueira professor da UNIFEI e o professor Amaro Pereira do PPE/COPPE/UFRJ. Neste momento, discutiram-se as projeções para a matriz energética do Brasil no futuro, em particular quanto ao uso em transportes.

O III *Workshop* Cenários Prospectivos para Uso de Energia em Transportes – Inovações disruptivas foi realizado no dia 18 de dezembro de 2017 e contou com a participação de mais de 76% do público esperado (63 participantes), com representantes de grandes empresas que atuam direta ou indiretamente no setor de transportes. Dentre elas, destacam-se: BYD, EccoMotor, Ipiranga, Petrobras, Petrobrás Distribuidora (BR), Petrobras CENPES, Scania e Siemens.

Representantes da APROBIO (Associação dos Produtores de Biodiesel do Brasil), Banco Mundial, CEBDS (Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento), CNT, GIZ (*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*), Greenpeace, IPTC (Instituto Paulista do Transporte de Cargas), ITDP e do SEST/SENAT (Serviço Social do Transporte/Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte) também compareceram ao evento. A academia foi representada pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET – RJ) e os programas PET e PPE da COPPE/UFRJ. O Governo Federal esteve presente por meio da ANP, da EPE e do Ministério das Cidades. O Governo Municipal esteve presente por meio da Secretaria Municipal de Transportes (SMTR) da Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro.

Na parte da manhã após a apresentação do cenário tendencial do setor de transportes, foram apresentadas inovações disruptivas para o setor, com destaque para a geração fotovoltaica como oportunidade para viabilização econômica da eletromobilidade no Brasil, injeção de hidrogênio nos motores de combustão interna por meio de equipamentos de conversão, alternativas energéticas para o *last mile*, mobilidade digital e a eletrificação de modos de alta capacidade como o ferroviário. Após este conjunto de apresentações, realizou-se uma mesa redonda para discussão.

Na parte da tarde houve uma breve apresentação das premissas já contempladas em cenários considerados como não disruptivos, como o Cenário tendencial, que considera a visão governamental, e o cenário de 1,5° C, que seria uma situação arrojada de redução de emissões de GEE. Em seguida, foi estabelecido um Grupo Focal, seguindo o método de associação livre onde foram discutidas apenas propostas de inovações disruptivas e premissas que podem ser adotadas para estabelecimento de diferentes cenários para a matriz energética para os transportes no Brasil até o ano de 2050, considerando alterações na demanda de energia e as consequentes emissões de CO₂.

Do menu de opções apresentado, os pontos discutidos para cada inovação foram: ano de introdução com percentual de participação, barreiras a introdução, instrumentos para superar as barreiras, custos e recomendações de referências relacionadas as inovações disruptivas. Posteriormente, o espaço foi aberto para sugestões de outras inovações disruptivas, onde os especialistas puderam apresentar novas propostas devidamente respaldadas por material que deu suporte a argumentação. Por fim, foi aberto o espaço para coletar sugestões de oportunidades de melhoria para a realização de eventos futuros.

Por fim, o IV Workshop Cenários Prospectivos para Uso de Energia em Transportes ocorreu no dia 27 de março de 2019, contando com a presença de 40 participantes, com

representantes de grandes empresas que atuam direta ou indiretamente no setor de transportes. Dentre elas, destacam-se: Netz Engenharia Automotiva, Petrobrás e Scania.

O Governo Federal esteve presente por meio da ANP, do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea). O Governo Estadual esteve presente por meio de representantes do Instituto Estadual do Ambiente (INEA).

A academia foi representada pelos Programas de Engenharia de Transportes (PET) e Planejamento Energético (PPE) da COPPE/UFRJ, pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia (IME) e pelo Laboratório de Transportes (Lastran) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Representantes da GIZ, Greenpeace, INEA, ITDP e do SEST/SENAT (Serviço Social do Transporte/Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte) também compareceram ao evento.

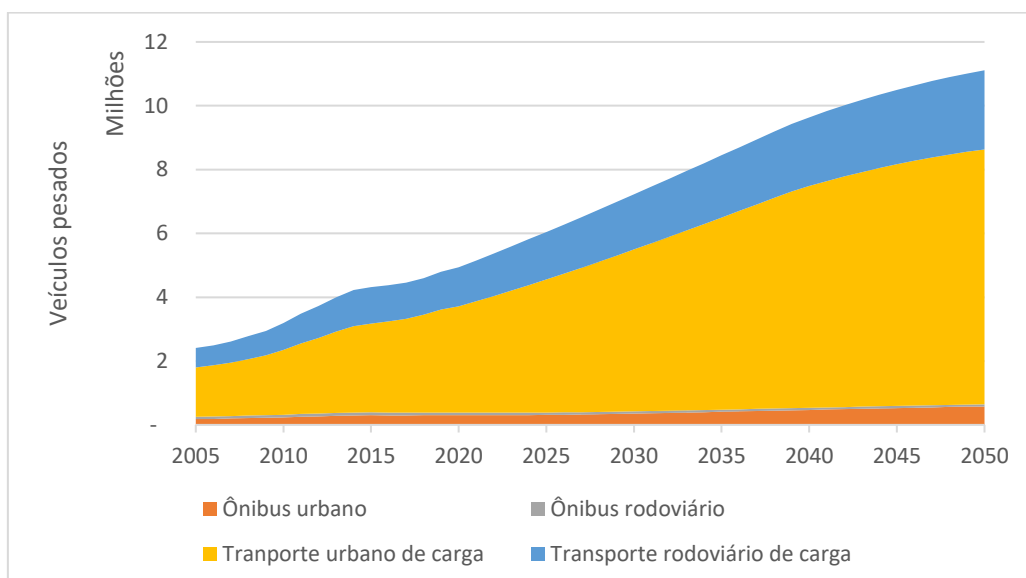
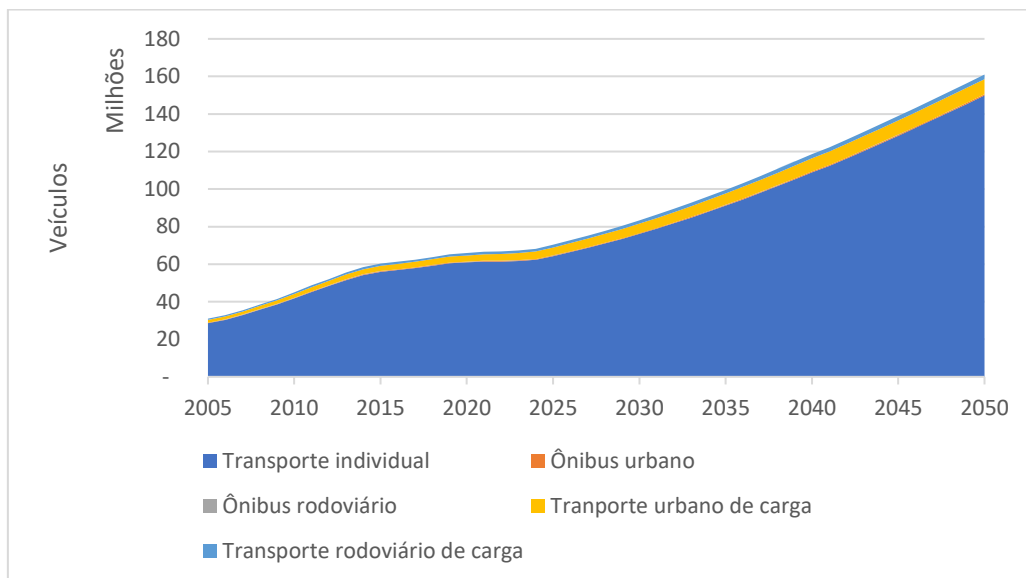
O público presente no evento participou de três horas e meia de exposição a informações veiculadas por meio de exposição oral, sendo uma hora dedicada ao nivelamento dos principais conceitos, medidas de mitigação e tecnologias do setor de transportes. Por fim, foram dedicadas duas horas de interação com os palestrantes por meio da mesa redonda e do grupo focal, sendo debatidos a validação e participação de cada ação de mitigação, bem como a versão final do método TEMA e suas variáveis de entrada e saída.

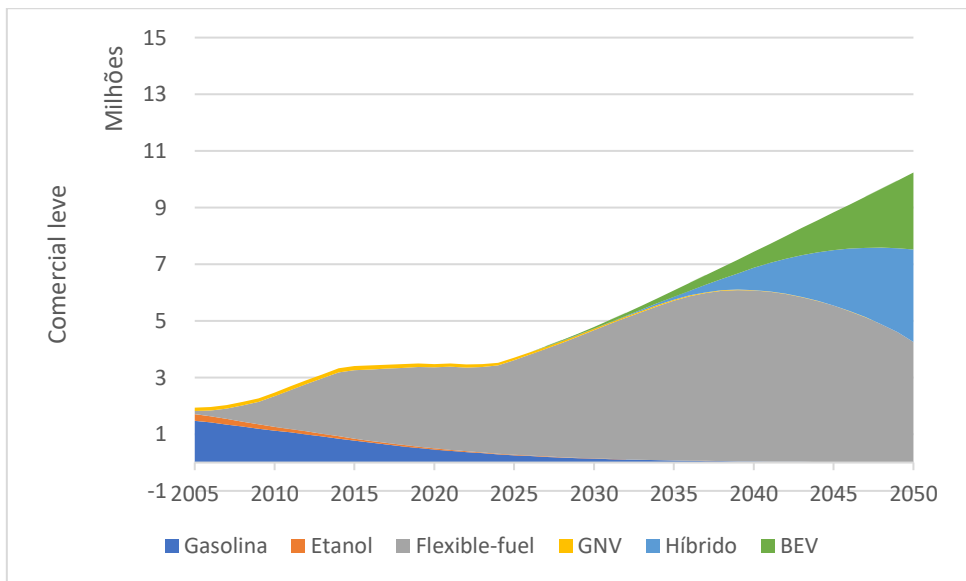
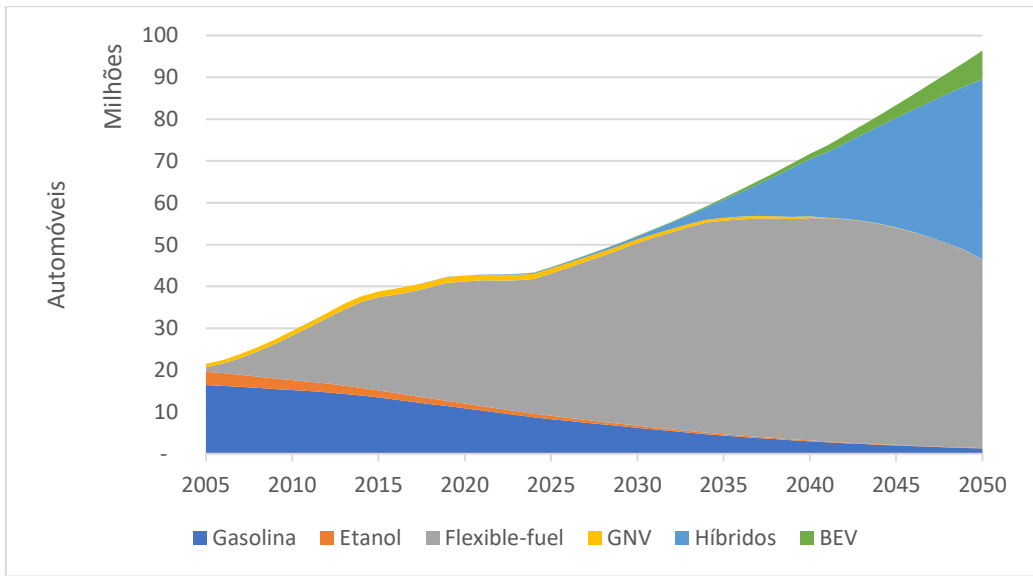
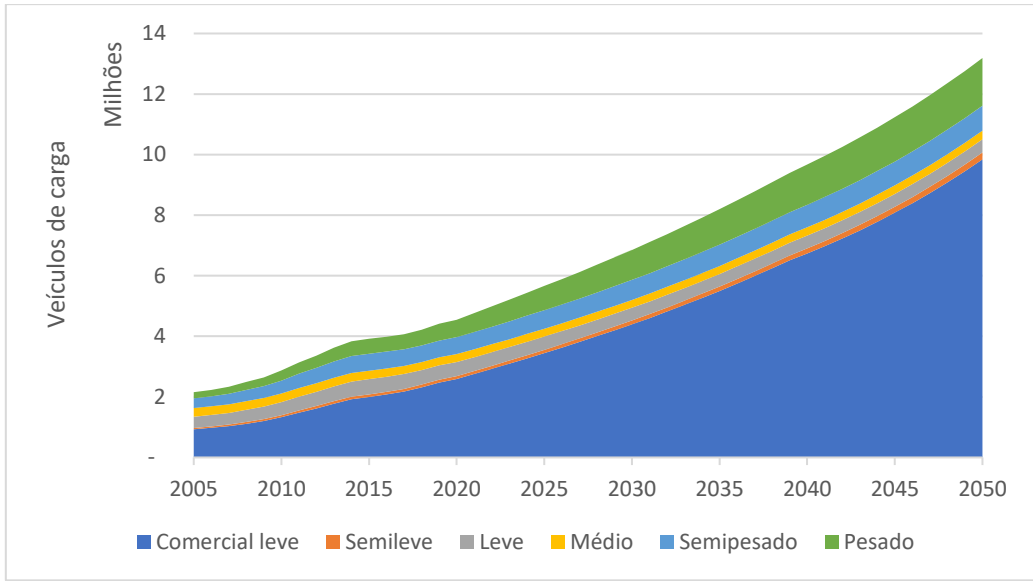
Todos os participantes tiveram acesso antecipado, por meio eletrônico, o relatório “Transportes no Brasil – Panorama e Cenários Prospectivos para Atendimento da Contribuição Nacionalmente Determinada”, que foi um dos focos do debate.

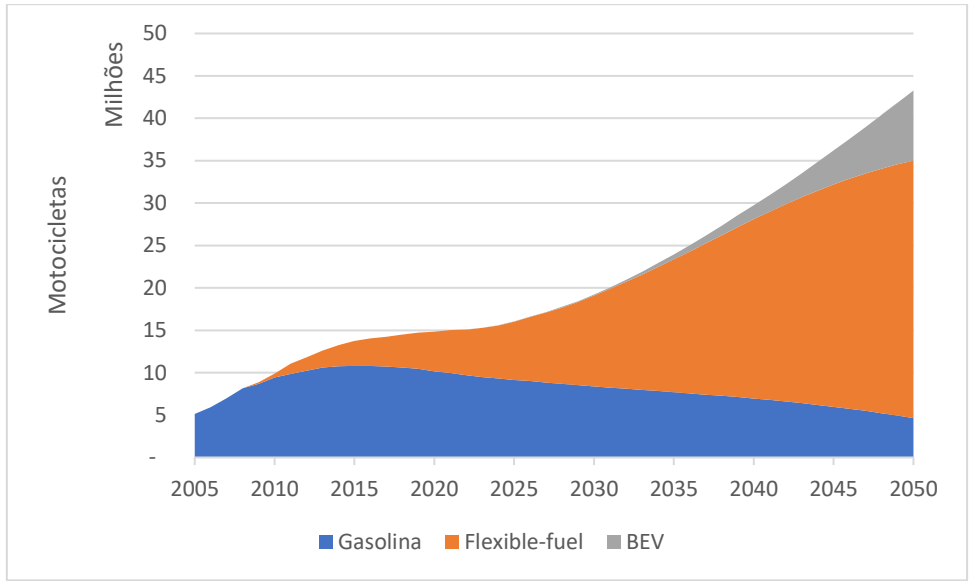
Como resultado, as opções de mitigação consideradas, o método TEMA, os novos rendimentos energéticos da categoria caminhões e coeficientes das funções Gompertz e Logística (curva de sucateamento) foram ratificados.



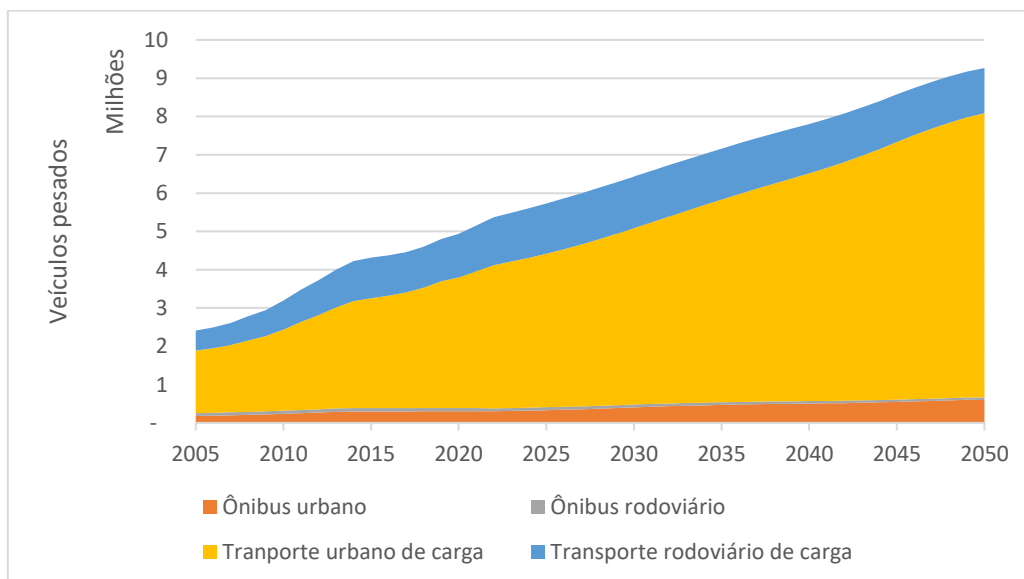
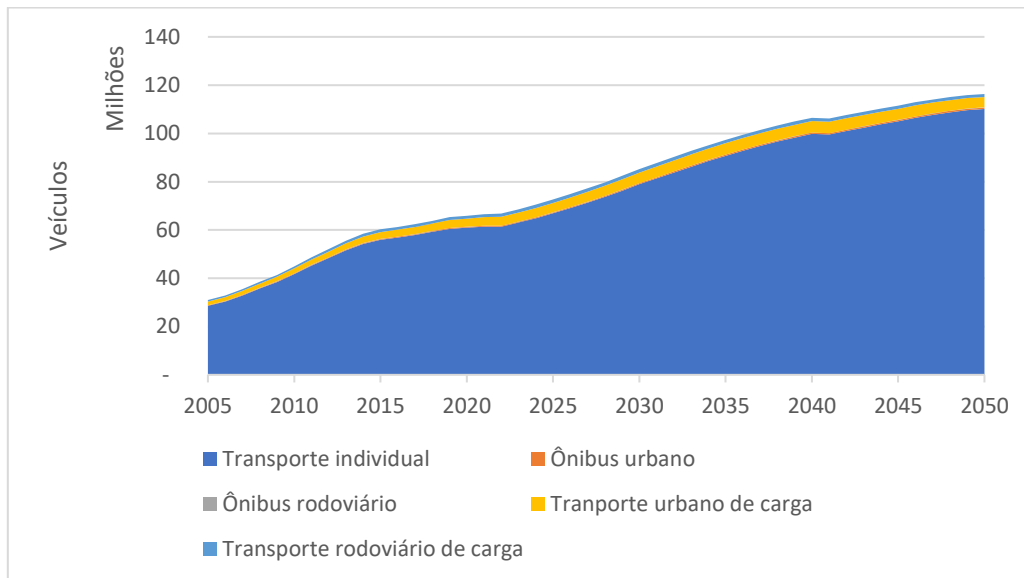
APÊNDICE II – EVOLUÇÃO DA FROTA CIRCULANTE, EM MILHÕES DE VEÍCULOS, POR TIPO DE VEÍCULO E TECNOLOGIA – CENÁRIO TENDENCIAL

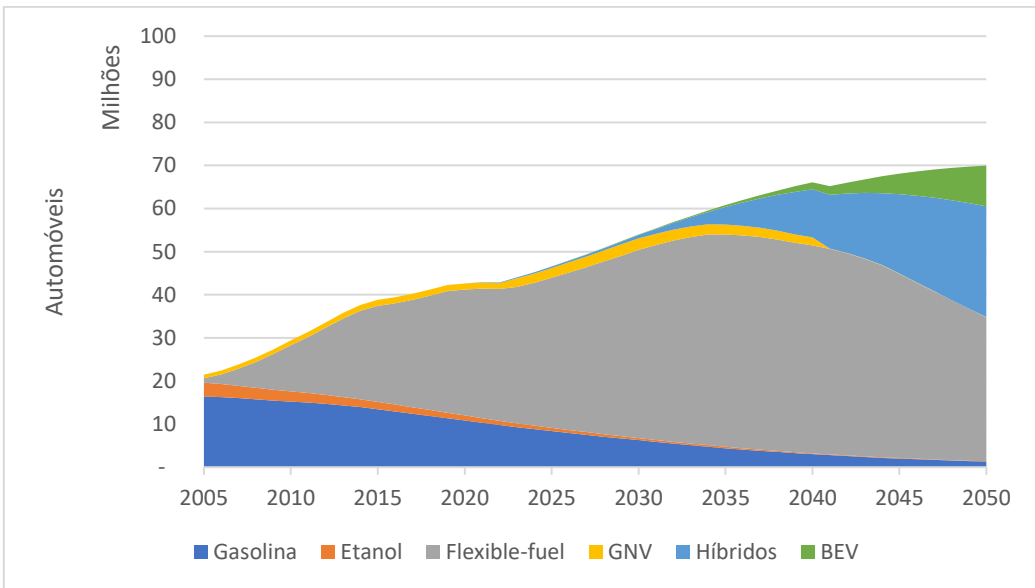
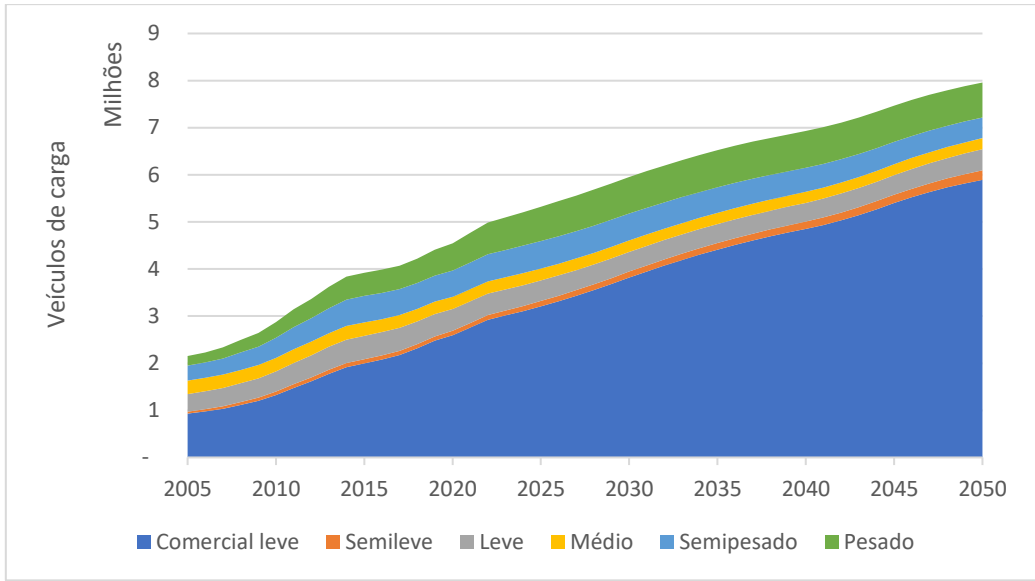


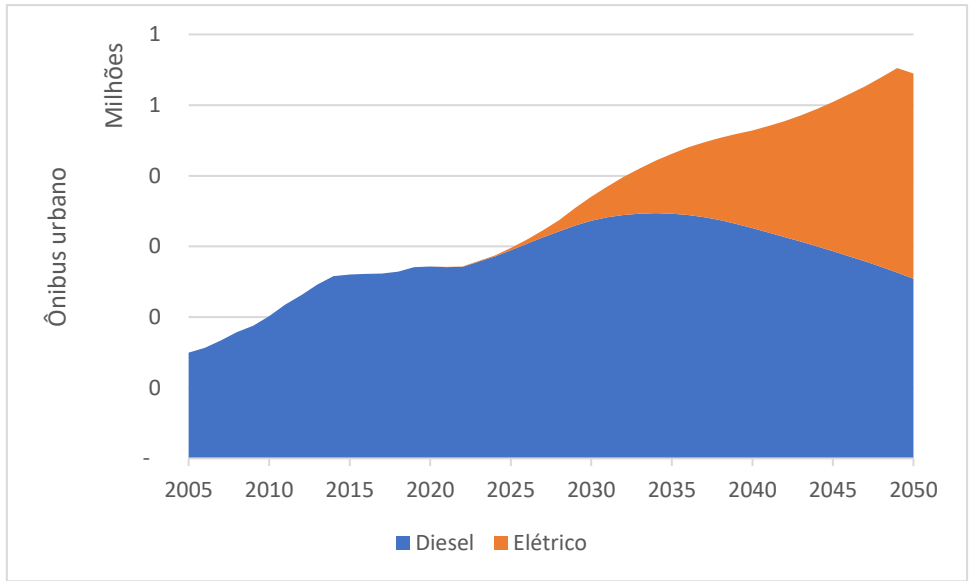
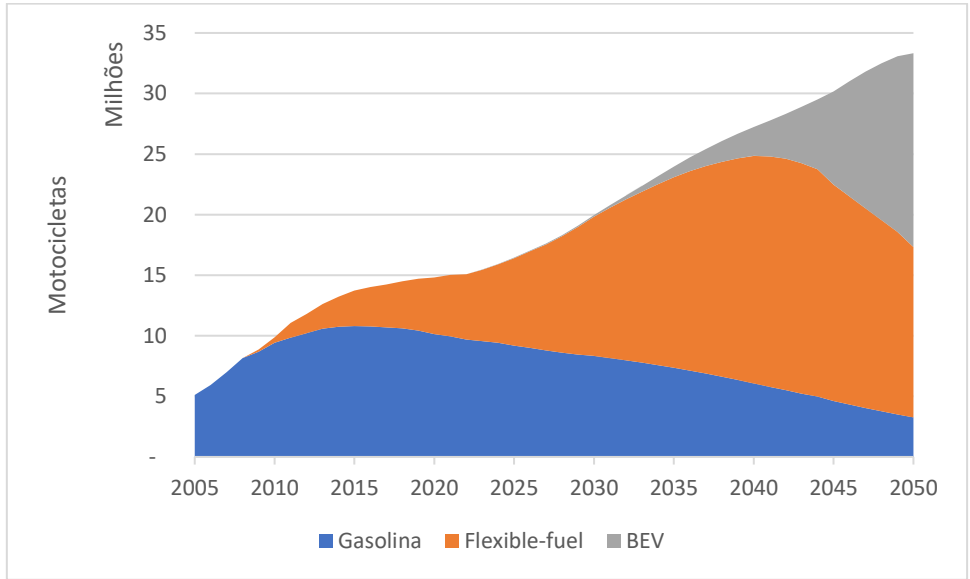
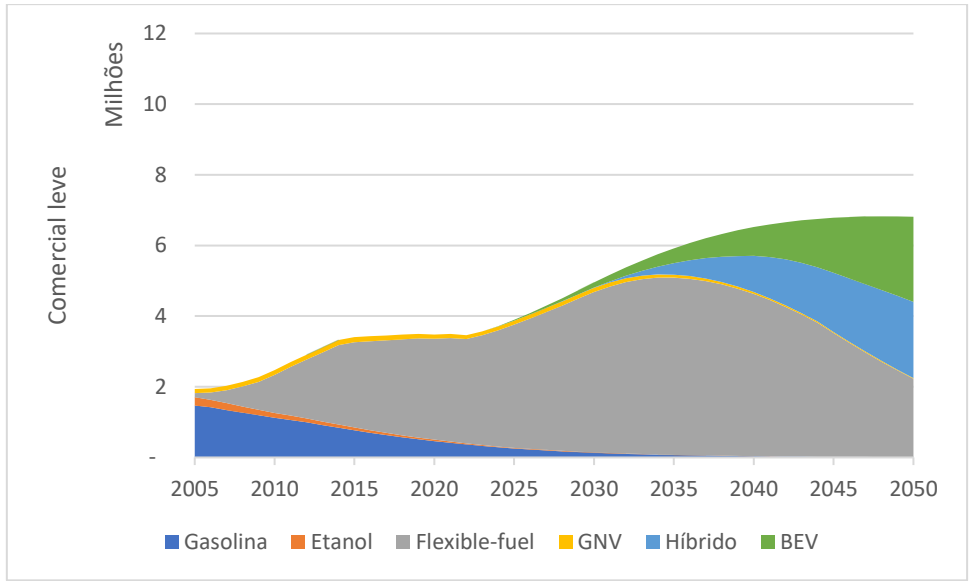


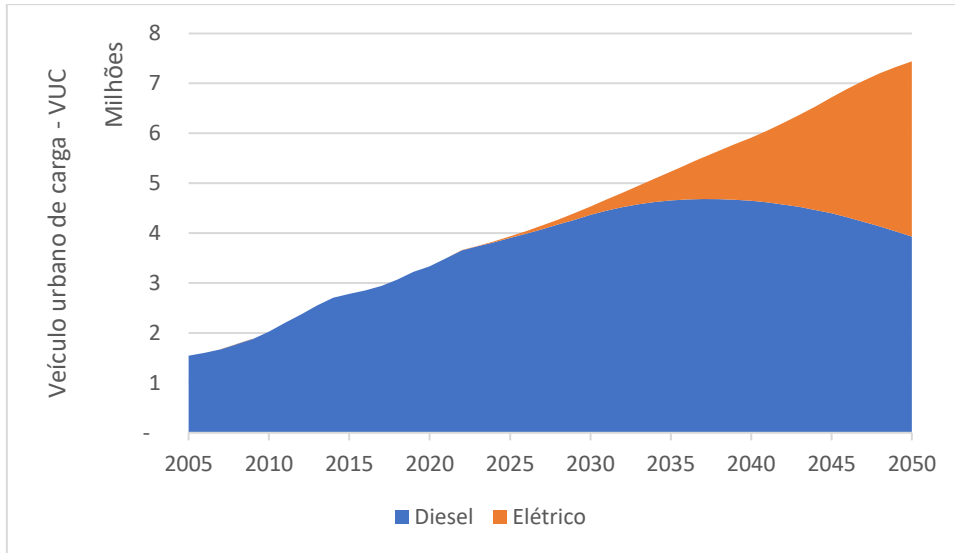


APÊNDICE III – EVOLUÇÃO DA FROTA CIRCULANTE POR TIPO DE VEÍCULO E TECNOLOGIA – CENÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL









ANEXO A – PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS RELACIONADOS AO TEMA DE PESQUISA

A Tabela AA.1 apresenta os eventos onde parte do método desenvolvido e das premissas consideradas foram apresentados e debatidos, bem como os cenários elaborados por meio desse.

Tabela AA.1: Eventos relacionados ao tema de pesquisa

Nome do evento	Ano	Organização
Tecnologias de Mitigação de emissões de GEE no Brasil até 2050	2016	Centro Clima, iCS e WWF
Cenários para a Sustentabilidade dos Transportes no Brasil	2016	Petrobrás
XXX ANPET	2016	ANPET
Cenários de Mitigação de emissões de GEE no Brasil até 2050	2017	Centro Clima, iCS e WWF
O Futuro dos combustíveis	2017	CENPES
Câmara temática de transportes	2017	FBMC
XII UFRJ AMBIENTÁVEL	2017	UFRJ
Relevância do setor de transportes na demanda energética nacional	2017	EPE
<i>Energy Efficiency Training Week for Latin America</i>	2017	IEA
<i>Reunião Técnica sobre os Novos Rumos do PROCONVE e do PROMOT</i>	2017	CONAMA/MMA
Eficiência Energética na Mobilidade Urbana	2018	M. Cidades e GIZ
XXXII ANPET	2018	ANPET
Projeto MRV	2018	FBMC
Perspectivas para a Mobilidade Elétrica no Brasil	2019	Promob-e
Reunião da Comissão de Ciência & Tecnologia	2020	PNME
3 Plenárias da Iniciativa Clima e Desenvolvimento	2020	iCS
Transição para uma Mobilidade Urbana Zero	2021	MDR, IABS e BID
Emissões: desafios e perspectivas		

ANEXO B – ELABORAÇÃO DE RELATÓRIOS TÉCNICOS RELACIONADOS AO TEMA DE PESQUISA

A Tabela BA.1 apresenta os relatórios técnicos relacionados ao tema deste trabalho e que utilizaram versões preliminares do TEMA (Total ou parcialmente¹)

Tabela BA.1: Lista de Relatórios Técnicos

Nome	Ano	Link para download
[R]evolução Energética. Rumo a um Brasil com 100% de Energias Limpas e Renováveis	2016	http://www.greenpeace.org/brasil/Global/brasil/image/2015/Dezembro/2016/Revolu%C3%A7%C3%A3o%20Energ%C3%A9tica%202016.%20Greenpeace%20Brasil.pdf
Matriz Energética do Estado do Rio de Janeiro 2015-2030 - Setor de Transporte	2016	http://www.rj.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=097c98e5-a801-4733-88a7-d51f6ad1494e&groupId=132914
Análise de Alternativas de Mobilidade de Baixo Carbono	2016	http://www.fundoverde.ufrj.br/index.php/pt/noticias/274-analise-de-alternativas-de-mobilidade-de-baixo-carbono
Brasil em Números - Setor de Transportes - 2017	2017	https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2/bn_2017_v25.pdf
Future prospective scenarios for the use of energy in transportation in Brazil and GHG emissions - Business as Usual (BAU) Scenario - 2050	2017	http://www.ltc.coppe.ufrj.br/index.php/projetos/projetos-concluidos/336-future-prospective-scenarios-for-the-use-of-energy-in-transportation-in-brazil-and-ghg-emissions-business-as-usual-bau-scenario-2050
Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de Emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Brasil até 2050	2017	http://www.centroclima.coppe.ufrj.br/images/documentos/ies-brasil-2050/2_-_Cenario_de_Emiss%C3%B5es_de_GEE_-_Setor_de_Agricultura_Floresta_e_Outros_Usos_da_Terra_-_IES_Brasil_2050.pdf
Matriz Energética do Estado do Rio de Janeiro (2017-2031)	2018	http://www.rj.gov.br/web/sedeis/exibeconteudo?article-id=6797048
Cenários de Emissão de Gases de Efeito Estufa até 2050 no Setor de Transportes: Referência e 1,5°C	2018	http://www.centroclima.coppe.ufrj.br/images/Noticias/documentos/5_-_Transporte.pdf
GHG Emissions in Brazil up to 2030 under Current Mitigation Policies - ICAT Brazil Project	2018	https://climateactiontransparency.org/wp-content/uploads/2022/04/Deliverable-3_Brazil-Final-Report.pdf
Eficiência Energética na Mobilidade Urbana	2018	https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSEM/OB/Biblioteca/Caderno-Tecnico-de-Referencia-Eficiencia-Energetica-na-Mobilidade-Urbana.pdf
Matriz Energética do Estado do Rio de Janeiro 2017-2031	2018	antigo.ppe.ufrj.br/ppe/publicacoes/me_versaocompleta.pdf
Guia de Referência - Uso de Energia Eficiente na Mobilidade Urbana	2019	https://ibts.eco.br/src/uploads/2019/11/ueemu_ibts_final_isbn.pdf
Transportes no Brasil: Panorama e Cenários Prospectivos para atendimento da Contribuição Nacionalmente Determinada	2019	https://ibts.eco.br/src/uploads/2019/12/transportes-no-brasil_relatorio-de-referencia.pdf
Brasil em Números - Setor de Transportes - 2019	2019	https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2/bn_2019_v27.pdf
Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das	2019	https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEP/ED/clima/Comunicacao_Nacional/Comunicacao_Nacional.html

Nome	Ano	Link para download
Nações Unidas sobre Mudança do Clima Preparação de Modelagem para Estimar os Impactos Socioeconômicos da Adoção de um Instrumento de Precificação de Carbono como parte do Pacote de Implementação da NDC Brasileira – Componente 2a (Modelagem)	2020	https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-externo/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/pmr/componente-2/produto-4-resultados-e-analise.pdf
Transição para uma mobilidade de urbana zero emissão	2021	https://ibts.eco.br/src/uploads/2021/09/cr-transicao-zero-emissao-sem-consideracoes.pdf
Climate ambition beyond emission numbers - Taking stock of progress by looking inside countries and sectors	2021	https://www.iddri.org/en/publications-and-events/report/climate-ambition-beyond-emission-numbers-taking-stock-progress
Clima e Desenvolvimento: Visões para o Brasil 2030 – Documento de cenários e políticas climáticas	2021	https://docplayer.com.br/225007225-Clima-e-desenvolvimento-visoes-para-o-brasil-2030.html

¹Apenas um modo de transporte e/ou atividade