



ANÁLISE DA INTENSIDADE DE CARBONO NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO NO BRASIL

Mariane Gonzalez da Costa

Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Engenharia de Transporte.

Orientador: Márcio de Almeida D'Agosto

Rio de Janeiro
Setembro de 2019

ANÁLISE DA INTENSIDADE DE CARBONO NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO
NO BRASIL

Mariane Gonzalez da Costa

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

Examinada por:

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

Profa. Suzana Kahn Ribeiro, D.Sc.

Prof. Amaro Olímpio Pereira Junior, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2019

Costa, Mariane Gonzalez da

Análise da Intensidade de Carbono no Transporte Rodoviário no Brasil/ Mariane Gonzalez da Costa. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

X, 86 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Márcio de Almeida D’Agosto

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transporte, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 67 - 72.

1. Intensidade de Carbono. 2. Intensidade Energética. 3. Setor de Transporte. I. D’Agosto, Márcio de Almeida. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

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

ANÁLISE DA INTENSIDADE DE CARBONO NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO NO BRASIL

Mariane Gonzalez da Costa

Setembro/2019

Orientador: Márcio de Almeida D'Agosto

Programa: Engenharia de Transportes

A adoção de medidas de mitigação é necessária para o alcance das metas de redução de Gases de Efeito Estufa (GEE) estabelecidas pelo Brasil no acordo de Paris. A partir da aplicação do método desenvolvido neste estudo para o contexto nacional, objetiva-se analisar o histórico da Intensidade de Carbono (IC) e Intensidade Energética (IE) do setor de transporte, entre 1990 e 2018, indicando quais medidas identificadas possuem impacto positivo na IC e IE devem permanecer e/ou serem aperfeiçoadas para o alcance dessas metas. As principais medidas identificadas foram o aumento da Eficiência Energética do sistema e o incentivo ao uso de energia alternativa aos combustíveis fósseis. O impacto da geração de energia e produção de combustíveis é analisada por meio da comparação entre a IC considerando o ciclo de vida e considerando o uso final. Programas como o RenovaBio apresentam a manutenção das medidas historicamente adotadas e o Rota 2030 busca o aumento da Eficiência Energética do transporte rodoviário. No entanto, o Brasil ao incentivar o uso de biocombustíveis, apresentando tendências contrárias à eletrificação da frota que ocorre em países desenvolvidos e em desenvolvimento. Apesar do Promob-e, programa que busca incentivar a normatização e regulamentação de veículos elétricos, o Brasil se mostra aquém na eletrificação da frota em comparação a outros países. Sendo assim, o levantamento de fatores políticos-histórico permitiu a realização de uma avaliação crítica das medidas adotadas no Brasil, indicando quais delas devem ser mantidas e aquelas que devem ser aperfeiçoadas para se ampliar os resultados obtidos.

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

CARBON INTENSITY ANALYSIS FOR BRAZIL ROAD TRANSPORTATION SECTOR

Mariane Gonzalez da Costa

September/2019

Advisor: Márcio de Almeida D'Agosto

Department: Transport Engineering

It is necessary the adoption of mitigation measures to achieve the Greenhouse Gas (GHG) reduction targets set by Brazil in the Paris agreement. From the developed method application for national context, this study aims to accomplish a historical analyze of Carbon Intensity (IC) and Energy Intensity (IE) of the transport sector, between 1990 and 2018, indicating which identified measures have a positive impact on CI and IE should remain and / or be improved to achieve those goals. The main measures identified were increasing the system's energy efficiency and encouraging the use of alternative energy to fossil fuels. The impact of power generation and fuel production is analyzed by comparing life cycle CI with end use CI. Programs such as RenovaBio present the maintenance of the historically adopted measures and Rota 2030 seeks the road transport Energy Efficiency improvement. However, by encouraging the use of biofuels, Brazil presents trends contrary to what occurs in developed and developing countries. Despite the Promob-e, program that seeks to encourage the standardization and regulation of electric vehicles, Brazil lags behind in fleet electrification compared to other countries. Thus, the survey of historical political factors allowed a critical evaluation of the measures historically adopted in Brazil, indicating which ones should remain and which one should be improved to broaden the results obtained.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Contextualização.....	1
1.2	Descrição do problema de pesquisa.....	1
1.3	Justificativa	2
1.4	Objetivos Geral e Específico	3
1.5	Abrangência da pesquisa	4
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	5
2.1	Métodos e Unidades de Medida de Intensidade de Carbono.....	5
2.1.1	Revisão Sistemática da Literatura - Métodos e medidas de IC.....	5
2.1.2	Pesquisa Documental.....	13
2.2	Base Conceitual	14
2.2.1	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas.....	14
2.2.2	Abordagens Top-down e Bottom-up.....	18
2.2.3	Método MRV.....	18
2.2.4	Indicadores.....	20
2.2.5	Análise de Ciclo de vida.....	21
2.2.6	Métodos de decomposição.....	23
3	PROPOSTA DE PROCEDIMENTO	24
3.1	Fase 1: <i>Coleta de dados</i>	27
3.2	Fase 2: <i>Fator de Escala e Fator de Emissão</i>	29
3.3	Fase 3: <i>Cálculo Emissões</i>	30
3.4	Fase 4: <i>Validação e Cálculo IC</i>	31
3.5	Fase 5: Análise Qualitativa e Quantitativa	31
4	APLICAÇÃO E ANÁLISE.....	33
4.1	Rodoviário	34
4.1.1	Coleta de dados e Cálculo das emissões.....	34

4.1.2	Validação e Cálculo da IC	35
4.1.3	Análise Qualitativa e Quantitativa.....	36
4.2	Outros modos	43
4.2.1	Aéreo	43
4.2.2	Aquático	50
4.2.3	Ferroviário	52
4.3	Setor de Transporte.....	58
4.3.1	Coleta de dados e Cálculo das emissões.....	58
4.3.2	Validação e Cálculo da IC	59
4.3.3	Análise Qualitativa e Quantitativa.....	59
4.4	Setor de energia	68
4.4.1	Histórico Geração de Energia.....	68
4.4.2	Estimativa WTW para IC do setor de transporte.....	69
5	CONCLUSÃO.....	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
	Apêndice 1	84
	Apêndice 2.....	85
	Apêndice 3.....	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição temporal da RSL.....	7
Figura 2: Distribuição espacial dos países estudados por continente nos artigos incluídos na RSL	8
Figura 3: Distribuição por periódicos dos artigos incluídos na RSL.....	8
Figura 4: Principais unidades da medida de IC e sua correlação com as abordagens e métodos utilizados nos estudos levantados na RSL	12
Figura 5: Ordem cronológica dos principais relatórios publicados pelo IPCC	14
Figura 6: Níveis estabelecidos pelo IPCC, 2006	15
Figura 7: Definição dos termos M-R-V.....	19
Figura 8: Processo para ACV	22
Figura 9: Delimitações ACV para o setor de transporte.....	22
Figura 10: Métodos de decomposição	24
Figura 11: Metodologia proposta para o cálculo da IC do setor de transporte.....	26
Figura 12: Gráfico comparativo de emissão de CO _{2e} do modo rodoviário.....	36
Figura 13: IC do transporte de carga do modo rodoviário	37
Figura 14: IE do transporte de carga do modo rodoviário.....	38
Figura 15: IC do transporte de passageiros do modo rodoviário.....	40
Figura 16: IE do transporte de passageiros do modo rodoviário.....	43
Figura 17: Gráfico comparativo de emissão de CO _{2e} do modo aéreo	44
Figura 18: Intensidade de Carbono do transporte de passageiros do modo aéreo.....	46
Figura 19: Intensidade Energética do transporte de passageiros do modo aéreo	47
Figura 20: Intensidade de Carbono do transporte de carga do modo ferroviário	54
Figura 21: Intensidade Energética do transporte de carga do modo ferroviário	54
Figura 22: Variação ano a ano da IC e IE para o modo ferroviário	55
Figura 23: Intensidade Energética por ferrovia, no Brasil.....	57
Figura 24: Comparativo da IE das ferrovias EFC e EFVM operadas pela Vale e da média das ferrovias em operação no Brasil.....	57
Figura 25: IC dos modos e IC total do transporte de carga no Brasil	60
Figura 26: Divisão modal do transporte de carga.....	60
Figura 27: IC do transporte de passageiros no Brasil.....	63
Figura 28: Divisão modal do transporte de passageiros	64
Figura 29: IC considerando o ciclo de vida e apenas o uso final para o transporte de carga	

no Brasil.....	71
Figura 30: IC considerando o ciclo de vida e apenas o uso final para o transporte de passageiros no Brasil	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Síntese dos artigos referentes aos dados e metodologia para IC	9
Tabela 2: Dados de entrada necessários à determinação da abordagem a ser utilizada .	29
Tabela 3. Principais combustíveis utilizados no modo rodoviário, por atividade, no Brasil	34
Tabela 4. Categoria de veículos rodoviários	35
Tabela 5. Tabela Resumo do transporte de carga.....	61
Tabela 6. Tabela Resumo do transporte de passageiros	65

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As mudanças climáticas podem ter grandes impactos nas economias regionais e nacionais, nos ecossistemas naturais e manejados e na saúde e mortalidade humanas. As emissões anuais de Gases de Efeito Estufa (GEE) devem ser reduzidas entre 50% e 80% em todo o mundo até 2050, a fim de estabilizar o clima e evitar os impactos mais destrutivos da mudança climática (Leighty *et al.*, 2012).

Na 21ª Conferência das Partes (COP21) da UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*), em Paris, foi proposto um acordo que visa reduzir as emissões de GEE no contexto do desenvolvimento sustentável, com compromisso de manter o aumento da temperatura média global em menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais. Para os países que assinaram o acordo, foi estabelecido que fosse elaborada e comunicada suas ações climáticas pós-2020, conhecidas como suas NDCs (*Nationally Determined Contributions*). Para o Brasil, as metas estabelecidas no acordo de Paris foram uma redução de 37% até 2025 da emissão de GEE e de 43% até 2030, em relação às emissões de 2005 (EPE, 2017).

De acordo com Sims *et al.* (2014), o setor de transporte produziu 7,0 GtCO₂e de emissões diretas de GEE (incluindo gases não-CO₂) em 2010 e, portanto, foi responsável por aproximadamente 23% das emissões totais de CO₂ relacionadas à energia. Em 2016, o transporte foi responsável por cerca de 24% das emissões totais (IEA, 2018a), sem apresentar melhora na sua representatividade frente outros setores.

No Brasil, o setor de transporte representa cerca de 14% das emissões de carbono (MCTI, 2016). Devido à dependência na utilização de combustíveis fósseis, há grande relevância em buscar a redução das emissões de GEE e do consumo de energia, por meio de medidas que promovam o aumento da eficiência energética (EE) (EEA, 2012) e reduzam a Intensidade de Carbono (IC).

1.2 Descrição do problema de pesquisa

A UNFCCC recomenda a utilização do método MRV (*Monitoring, Reporting and Verification*), que pode ser aplicado em diversos contextos, especialmente para o

monitoramento da emissão de CO₂, de modo a garantir que os esforços aplicados na redução de GEE estejam alinhados com as NDCs. Sendo assim, o método prevê um processo para estabelecer medidas de mitigação e de avaliação da integridade, consistência e confiabilidade da aplicação dessas medidas, em que se deve definir um processo de medição/monitoramento de indicadores-chave ao longo do tempo, tais como a Intensidade Energética (IE) e a IC.

Dessa forma, para a adoção de medidas de mitigação das emissões de GEE, é necessário estabelecer um cenário base para o setor de transporte, e um cenário *business as usual* (BAU), ou cenário tendencial, em que não há implementação de novas medidas de mitigação. O cenário tendencial é, portanto, definido a partir da compreensão do passado, que pode ser construída a partir de uma análise histórica, identificando fatores e medidas de mitigação que impactaram nas emissões de GEE e são mantidas atualmente.

Sendo assim, a partir de estabelecidos os cenários base e tendencial, é possível verificar o impacto de novas medidas de mitigação na construção de cenários futuros, que podem ter sua eficácia no atendimento às metas estabelecidas, verificando se há melhora dos indicadores. Esse método auxilia na tomada de decisão, em que serão estabelecidas quais medidas serão mantidas ou descontinuadas, bem como quais novas medidas podem ser implantadas.

Para avaliar a efetividade de medidas de mitigação que levem à redução da emissão de GEE em transportes, é oportuno avaliar os indicadores, tal como IC, das fontes de energia utilizadas nos transportes.

1.3 Justificativa

Para que se torne possível analisar a IC do setor de transportes, é necessário estabelecer quais os métodos e unidades de medida estão sendo utilizados na literatura para esse indicador. Há indícios de que este indicador tem sido calculado por meio de diferentes métodos e, portanto, pode apresentar diferentes unidades, tais como kg CO₂ (ou CO_{2e}) por unidade do Produto Interno Bruto (PIB), kgCO₂ por unidade de energia, e kgCO₂ por atividade de transporte (t.km ou pass.km). A partir de uma revisão sistemática da literatura (RSL), busca-se estabelecer a medida adequada a ser utilizada para este indicador no setor de transportes.

A partir desse levantamento na literatura, é possível, então, desenvolver um método de cálculo e análise da IC, de modo a se estabelecer a importância da aplicação de medidas de mitigação de emissão de GEE, bem como o seu impacto na IC e na IE do setor de transporte, auxiliando na tomada de decisão que permitirá a continuidade da implantação de tais medidas, ou na necessidade da escolha de novas medidas de mitigação, visando alcançar os compromissos firmados no Acordo de Paris para a redução desses gases.

1.4 Objetivos Geral e Específico

Este estudo tem como objetivo geral realizar uma análise histórica da IC da atividade de transporte no Brasil, utilizando-se dados nacional, que permitirá identificar medidas e fatores políticos históricos que impactaram na IC, bem como uma avaliação crítica das medidas de mitigação adotadas no passado. Este estudo visa contribuir para a construção de cenários futuros e subsidiar a aplicação do método MRV, fornecendo uma análise histórica que permite se estabelecer o cenário base e o cenário tendencial. Os objetivos específicos são:

- 1) Identificar, por meio de uma RSL, quais as unidades medidas, métodos e abordagens utilizadas para o cálculo da IC do setor de transporte, em nível de país, bem como os *inputs* e *outputs* para esta estimativa. Ainda, busca-se realizar uma avaliação dos métodos para estimativa da IC utilizados no Brasil e aqueles utilizados no mundo;
- 2) Realizar uma pesquisa documental para identificar os métodos e abordagens utilizados para o cálculo das emissões GEE e do momento de transporte, bem como realizar o levantamento desses dados;
- 3) Estimar a IC dos modos de transporte no Brasil, para passageiro e carga, analisando de forma específica o histórico do modo rodoviário, subsidiando essa análise por meio da análise dos outros modos de transporte, considerando a divisão modal do transporte no Brasil. Além disso, utiliza-se as variações no histórico da IE que possam auxiliar na análise da IC;
- 4) Realizar uma análise da IC total do setor de transportes, considerando o uso final e uma análise comparativa entre a IC considerando o uso final e o ciclo de vida, em que poderá ser considerada a produção de combustíveis e geração de energia, identificando os impactos do uso dos biocombustíveis e de eletricidade na matriz energética do transporte

1.5 Abrangência da pesquisa

A abrangência geográfica da RSL e da pesquisa documental é mundial, enquanto para a aplicação do procedimento e análise histórica da IC, compreende a área territorial do Brasil. A abrangência temporal determinada para a busca de artigos na RSL foram os últimos 10 anos. A análise histórica possui uma abrangência temporal de 28 anos, num período compreendido entre os anos de 1990 e 2018.

Este trabalho se subdivide em mais quatro capítulos além desta introdução. Apresenta-se o referencial teórico no capítulo 2, que se subdivide na apresentação da base conceitual e nos Métodos e unidades de medida para IC, por meio de uma RSL e a Pesquisa Documental. No capítulo 3, é apresentada a proposta de procedimento e sua aplicação é apresentada no capítulo 4. No capítulo 5 é apresentada as considerações finais deste estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste Capítulo são apresentados os conceitos necessários à uma melhor compreensão do assunto abordado nos capítulos seguintes. Além disso, são apresentados os procedimentos adotados para a realização da RSL, bem como para a Pesquisa Documental.

2.1 Métodos e Unidades de Medida de Intensidade de Carbono

Neste Capítulo são apresentados os dois métodos de Revisão Bibliográfica da Literatura, são eles: Revisão Sistemática da Literatura e Pesquisa Documental.

2.1.1 Revisão Sistemática da Literatura - Métodos e medidas de IC

O uso de procedimentos sistemáticos aumenta a confiabilidade dos resultados e diminui a possibilidade de erros (Brereton *et al.*, 2007). Contudo, a revisão sistemática se diferencia da revisão bibliográfica narrativa por adotar procedimentos sistemáticos para localizar estudos existentes, selecionar e avaliar as suas contribuições. Tais características tornam este tipo de revisão replicável (Cook e Haynes, 1997). Por tais motivos, optou-se por realizar uma RSL para identificar as metodologias existentes para cálculo da IC.

A proposta do procedimento a ser aplicado neste estudo está dividida nas seguintes etapas: (1) identificar e selecionar os trabalhos; (2) avaliar os trabalhos selecionados; (3) extrair dados e informações; e (4) sintetizar os dados. Quando estas etapas de revisão são aplicadas, é comum a identificação de muitos artigos. Entretanto, isso nem sempre significa que todos os documentos identificados serão selecionados e incluídos no estudo, mas sim que o universo da pesquisa foi adequadamente determinado, garantindo a qualidade da informação contida nos artigos, que devem estar alinhados com o objetivo da revisão.

2.1.1.1 Aplicação da Revisão Sistemática da Literatura

O objetivo desta revisão é identificar as unidades medidas existente na literatura para a IC do setor de transporte e selecionar a que mais se adequa a atividade deste setor, bem como os métodos utilizados para seu cálculo. Deste modo, optou-se por desenvolver uma

RSL, com o objetivo de responder a seguinte questão: Qual(is) a(s) melhor(es) e/ou mais apropriada(s) método(s) para medição da Intensidade de Carbono (indicador) e qual(is) as suas medidas?

A busca foi realizada na plataforma *Web of Science*, pois essa plataforma possui diversas bases indexadas. Foram selecionados apenas artigos científicos em inglês para os últimos dez anos (2008 – 2018). Como a aplicação de uma RSL é sensível à escolha das palavras chave, essas foram previamente selecionadas de forma a atender o objetivo definido neste estudo.

Para a realização da busca, foi selecionado o seguinte grupo de palavras-chave: “((*intensity*) and ((*CO₂*) or (*CO_{2eq}*) or (*CO_{2e}*) or (*GHG*) or (*Greenhouse gas**) or (*carbon*) or (*carbon dioxide*)) and (*transport* sector*))”. A combinação dos termos ((intensidade) e (CO₂) ou (CO_{2eq}) ou (CO_{2e}) ou (GEE) ou (gas* de efeito estufa) ou (carbono) ou (dióxido de carbono)) permite identificar trabalhos que tratem sobre IC. Por sua vez, a complementação do operador lógico “e” aos termos (setor de transporte) restringe a busca a artigos que, de fato, tratam da IC aplicada ao setor de transportes.

Destaca-se que a escolha deste grupo de palavras-chave não restringe a busca apenas a artigos que tratam sobre metodologia ou indicadores para avaliar a IC. Isso possibilitou a realização de uma busca mais abrangente, com objetivo de levantar um maior número de publicações, para, posteriormente, na etapa de leitura completa dos artigos, sejam selecionados apenas os artigos que tratam da IC no transporte.

2.1.1.2 Resultados da RSL

A partir da aplicação do procedimento metodológico descrito, foram identificados 234 artigos dos quais 71 foram selecionados após a leitura de seus títulos e resumos, pois consideravam em suas metodologias o indicador de IC do setor de transportes. Após a leitura completa dos artigos, foram incluídos 14 artigos que tratam de fato do indicador IC para o setor de transportes e, além disso, aplicavam o método com dados a nível de país, já que o objetivo deste estudo é analisar o histórico da IC para o Brasil.

Sendo assim, a distribuição temporal dos artigos identificados e daqueles que foram de fato incluídos neste estudo é apresentada na Figura 1. Observa-se que há um crescimento na publicação de artigos que expõe a preocupação com a emissão de GEE e o consequente

aquecimento da temperatura do planeta devida à emissão desses gases. Ao longo dos anos, principalmente após o acordo de Paris, em 2015, o número de artigos subiu de 30, em 2015, para 45 no ano de 2017 e, até o meio do ano de 2018, quando a RSL foi realizada, já havia 31 artigos relativo a esse tema. Desta forma, pode-se perceber uma importância crescente do tema na literatura internacional.

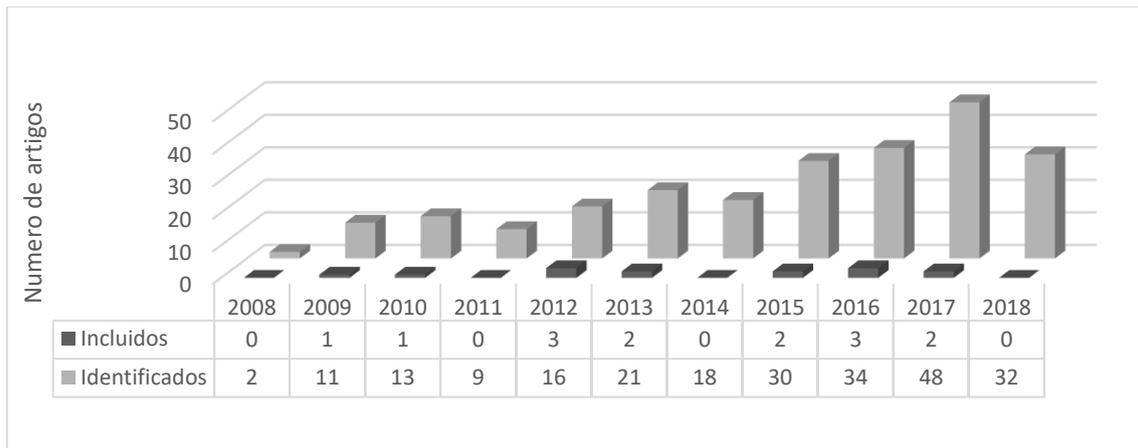


Figura 1: Distribuição temporal da RSL
Fonte: Elaboração própria

Quanto à distribuição espacial, são apresentados os números de países estudados, por continente, nos artigos selecionados (Figura 2), pois ao contrário seria difícil a visualização do gráfico devido ao grande número de países. Vale ressaltar que a China figurou como país que mais foi alvo de estudos, aparecendo em 36% dos artigos, seguido pela Finlândia, em 21% dos artigos selecionados, e da França, Suécia e Itália, estudados em 14% dos artigos. Ainda, vale ressaltar que o estudo desenvolvido por Ben Abdallah *et al.* (2015) realizou uma análise de 90 países de todos os continentes, não contabilizados na Figura 2 devido à sua grande quantidade.

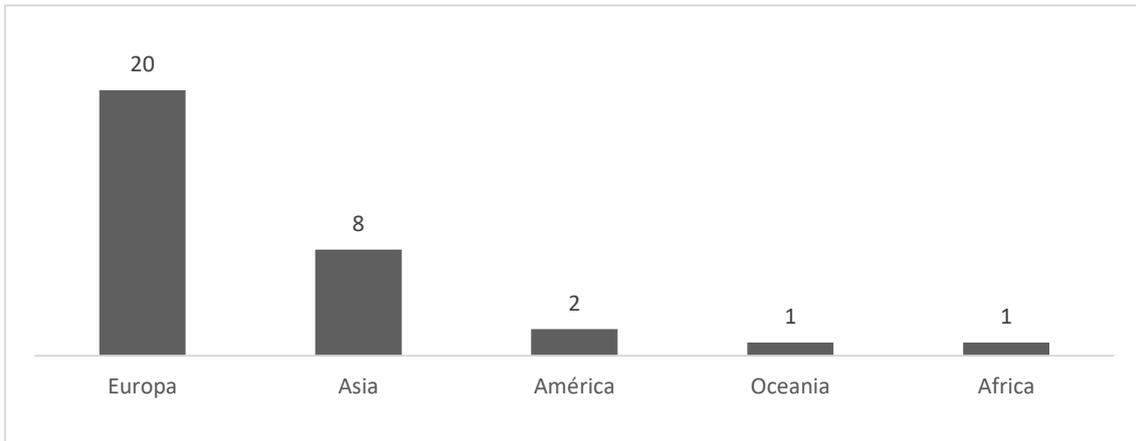


Figura 2: Distribuição espacial dos países estudados por continente nos artigos incluídos na RSL

Fonte: Elaboração própria

Quanto à distribuição por periódicos, apresentada na Figura 3, sete artigos foram publicados em revistas relacionadas à energia e quatro em revistas relacionadas especificamente ao transporte. Os outros artigos foram publicados em periódicos relacionados ao meio ambiente.

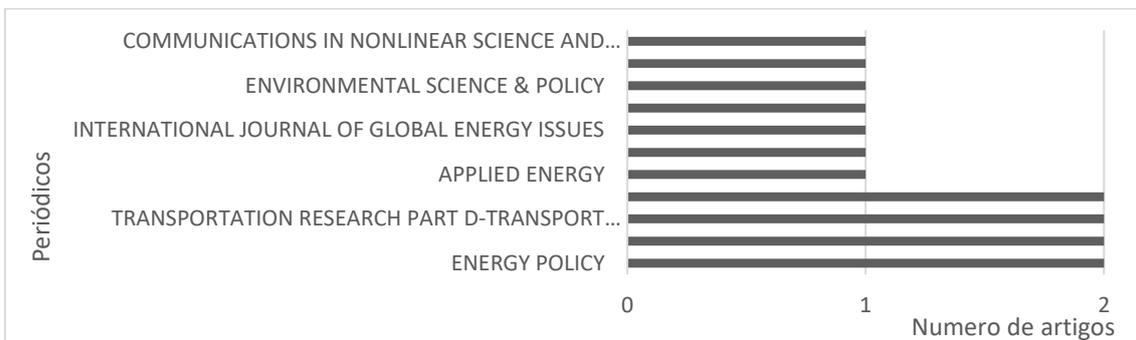


Figura 3: Distribuição por periódicos dos artigos incluídos na RSL

Fonte: Elaboração própria

Os dados obtidos nos artigos selecionados na RSL e inclusos neste estudo, consolidados na Tabela 1, referem-se à atividade de transporte considerada, passageiros e/ou carga; as abordagens utilizadas, *Top-down* e/ou *Bottom-up*; os métodos utilizados; a região em que foram aplicados; e o período de tempo considerado.

Tabela 1: Síntese dos artigos referentes aos dados e metodologia para IC

Autor	Atividade de transporte	Abordagem	Método	Região de estudo	Período de análise
Andreoni e Galmarini (2012)	Ambos	<i>Top-down</i>	Laspeyres Index	Espanha, Finlândia, Holanda, Dinamarca, Suécia, Noruega, França, Bélgica, República Checa, Estônia, Lituânia, Áustria, Itália, Alemanha e Grécia	1999 - 2008
Ben Abdallah <i>et al.</i> (2015)	Ambos	<i>Top-down</i>	OLS (<i>Ordinary Least Squares Regression</i>)	90 países	1980 - 2012
Daldoul e Dakhlaoui (2016)	Ambos	<i>Top-down</i>	Divisia Index	Tunísia	1980 - 2011
DeCicco (2013)	Passageiros	<i>Top-down</i>	Método de Decomposição	EUA e China	
Ji e Chen (2010)	Ambos	-	Metodologia proposta pelos autores com base na exergia química e ACV	China	1978–2004
Kamakaté e Schipper (2009)	Carga	<i>Bottom-up</i>	Laspeyres Index	Austrália, France, Japão, Reino Unido e US	1973 - 2005
Liang <i>et al.</i> (2017)	Ambos	<i>Top-down</i>	LMDI ¹	China	2000 a 2014
Liimatainen e Pöllänen (2013)	Carga	<i>Bottom-up</i>	Metodologia proposta pelos autores	Finlândia	1995 - 2010
Mao <i>et al.</i> (2012)	Ambos	<i>Bottom-up e Top-down</i>	CIMS <i>model system</i>	China	2008 a 2050
Miotti <i>et al.</i> (2016)	Ambos	<i>Bottom-up</i>	GREET	Estados Unidos	Ano base 1990 Cumprir metas 2030, 2040 e 2050
Mousavi <i>et al.</i> (2017)	Ambos	<i>Top-down</i>	LMDI	Irã	2003 a 2014
Tolón-Becerra <i>et al.</i> (2012)	Ambos	<i>Top-down</i>	Metodologia proposta pelos autores	Países União Europeia	1990 - 2008
Tongwane <i>et al.</i> (2015)	Ambos	<i>Bottom-up</i>	<i>Tier 2 method</i> (IPCC, 2006)	África do Sul e Lesotho	2000-2009
Wang <i>et al.</i> (2016)	Ambos	<i>Top-down</i>	LMDI	China	1996 - 2012

Fonte: Elaboração própria

Verificou-se que dos artigos apresentados na Tabela 1, cerca de 86% focam exclusivamente no setor de transporte, sendo que destes, 79% consideram ambas atividades de transporte e 14% apenas o transporte de carga. Convém destacar que 38% dos estudos consideram apenas o transporte rodoviário.

Dos artigos incluídos a partir da RSL, 57% deles adotam exclusivamente uma abordagem *Top-down*, enquanto 29% adotam exclusivamente uma abordagem *Bottom-up* e apenas um artigo adota ambas abordagens, com intuito de realizar a calibração e validação dos resultados.

Observou-se que 60% artigos que seguem uma abordagem *Bottom-up* focaram suas análises apenas no transporte pelo modo rodoviário, devido à diversidade de tipos de tecnologias (gasolina, gás natural veicular - GNV, óleo diesel, etanol e eletricidade) e de veículos (motocicletas, automóveis, veículos comerciais leves, micro-ônibus, ônibus urbano, ônibus rodoviário, caminhão semileve, caminhão leve, caminhão médio, caminhão semipesado e caminhão pesado), demandando, então, uma abordagem detalhada como a *Bottom-up*.

As metodologias mais utilizadas nos estudos foram aquelas relacionadas aos métodos de decomposição. O método *Laspeyres Index* foi utilizado em cerca de 13% dos estudos incluídos na RSL, e *Divisia Index*, utilizado em apenas em um estudo, enquanto o LMDI foi o método mais utilizado nos estudos identificados na RSL (25%).

As principais unidades de medida identificadas para o indicador de IC para o transporte estão sob a forma da emissão de GEE, em kg CO₂ (ou CO_{2e}), por unidade do PIB; ou, em kgCO₂, por unidade de energia; e kgCO₂ por atividade de transporte (t.km ou pass.km) ou por distância percorrida (km).

Os estudos de Kamakaté e Schipper (2009) e Tongwane *et al.* (2015) calcularam a IC utilizando a medida de emissão de GEE, em kgCO₂, por atividade de transporte (t.km), enquanto no estudo de Miotti *et al.* (2016) foi utilizado uma unidade diferente, gCO_{2e}/km, isto é, emissão de GEE por distância percorrida. Em todos eles, foi utilizada uma abordagem *Bottom-up*.

Os métodos utilizados nos estudos de Kamakaté e Schipper (2009), Miotti *et al.* (2016) e Tongwane *et al.* (2015) diferem. Enquanto o primeiro segue a linha dos métodos de decomposição, *Laspeyres Index*, os outros dois utilizam métodos específicos para transportes, método *tier 2*, proposto por IPCC (2006), e o modelo GREET (*Greenhouse Gases Regulated Emissions and Energy Use in Transportation*), respectivamente.

Vale observar que, de modo geral, os artigos encontrados na RSL utilizaram métodos para o cálculo de emissões de GEE, e utilizaram do indicador de IC como um indicador para análise no estudo, sem mencionar diretamente o motivo pelo qual foi utilizada determinada unidade de medida. Além disso, nenhum dos artigos teceu comentário referente a falta de padronização na unidade de medida existente na literatura, pois o enfoque foi dado no método de cálculo de emissão de GEE, que seria utilizado posteriormente para estimar a IC.

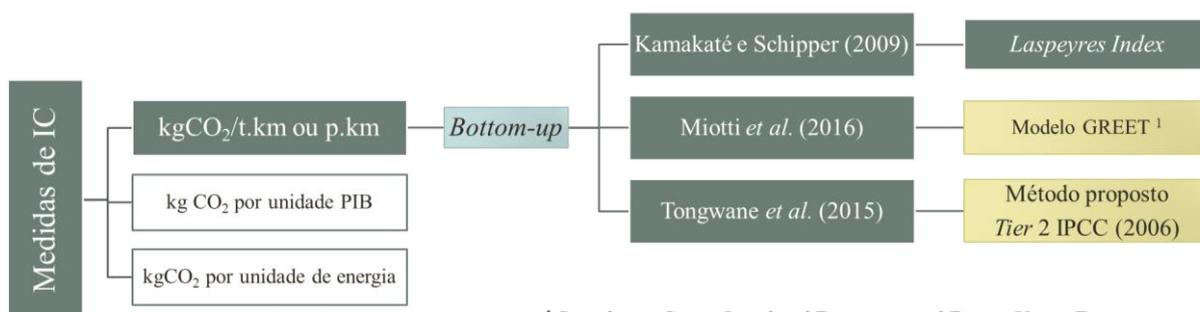
2.1.1.3 Dados de entrada e de saída

De acordo com os resultados obtidos na RSL e com os conceitos das abordagens definidos no subcapítulo 2.2.6, observou-se que apenas os estudos de Kamakaté e Schipper (2009); Miotti *et al.* (2016); Tongwane *et al.* (2015) consideraram para o indicador de IC a medida kgCO₂ por momento de transporte (t.km ou p.km).

Segundo Greening *et al.* (1999) a utilização do momento de transporte, em t.km ou p.km, permite uma análise combinada de diferentes modos de transporte de mercadorias e os efeitos de diferentes indicadores de intensidade, como, por exemplo, a IE dos modos de transporte. Desta forma, o cálculo da IC, bem como para IE, a partir da atividade de transporte para o setor de transportes permite uma análise dos modos separadamente e de forma combinada, seja para o transporte de carga ou passageiros.

Além destes, a grande parte dos estudos consideraram como unidade de medida de IC kgCO₂ por unidade de energia, enquanto outros estudos foram genéricos em suas estimativas para este setor específico, utilizando as medidas kg CO₂ por unidade monetária, isto é, considerando o dado macro, PIB do país em estudo.

Um esquema, apresentado na Figura 4, resume a correlação existente entre a unidade de medida para IC com a abordagem e os métodos utilizados nos três estudos levantados na RSL.



¹Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation

Figura 4: Principais unidades da medida de IC e sua correlação com as abordagens e métodos utilizados nos estudos levantados na RSL

Fonte: Elaboração própria

Vale relembrar que a abordagem *Bottom-up* considera dados desagregados, que permitem uma análise de sensibilidade maior, sendo, portanto, mais adequado para orientar a tomada de decisão para aplicação de medidas de mitigação, necessárias para atender aos compromissos de redução de emissão de GEE.

Para que isso possa ser de fato alcançado, é necessário que se realize a medição e análise do histórico da IC que permita identificar quais os pontos relevantes que devem continuar sendo investidos ou que necessitam ser modificados, por meio da aplicação de medidas de mitigação.

O estudo de Kamakaté e Schipper (2009) utilizou o método de *Laspeyres Index*, isto é, um método de decomposição para as emissões de CO₂. Como apresentado no subcapítulo 2.2.6, esses métodos possuem uma limitação que confere dificuldades na análise, que são os valores residuais da decomposição de fatores. Desta forma, esses métodos conferem certa instabilidade, já que estão sendo desenvolvidas tentativas de redução dessas limitações.

Além disso, foram identificados métodos específicos para se estimar emissões de modo desagregado por meio da abordagem *Bottom-up*, possibilitando o cálculo da IC de modo a se obter maior sensibilidade na análise. Ainda, a análise proposta neste estudo refere-se apenas ao setor de transportes, não se pretendendo a realização de uma análise multissetorial na qual a aplicação de métodos de decomposição seria mais adequada. Portanto, os métodos de decomposição não serão utilizados para o cálculo da IC neste estudo.

Por outro lado, o resultado obtido nessa RSL mostrou-se positivo ao apontar que os dois dentre os três estudos identificados que utilizaram a emissão de CO₂e e o momento de transporte para

o cálculo da IC do setor de transporte, aplicavam métodos específicos, considerando a abordagem *Bottom-up*, para o setor de transporte.

De acordo com Almeida *et al.* (2017), o momento de transporte tem alta correlação com frota de veículos e com o PIB. Desta forma, apesar das unidades de medida de IC identificadas estarem correlacionadas, o resultado obtido nessa RSL mostrou-se positivo ao se constatar que os dois, dos três estudos que utilizaram para o cálculo da IC especificamente para o setor de transporte, a emissão de CO₂e por momento de transporte. Além disso, esses estudos aplicaram métodos específicos, com abordagem *Bottom-up*, para o setor de transporte. Sendo assim, a medida de emissão de CO₂ por momento de transporte foi pré-selecionada para ser utilizada no método proposto, dependendo ainda da análise do resultado obtido na pesquisa documental.

2.1.2 Pesquisa Documental

A pesquisa documental foi realizada neste estudo em conjunto com a RSL, de modo a complementar os dados necessários a elaboração da proposta de procedimento e análise do histórico. A Pesquisa documental permite identificar relatórios técnicos e acadêmicos, que podem ter sido elaborados por instituições nacionais e internacionais.

Desta forma, os principais relatórios levantados estão relacionados ao cálculo das emissões de GEE e do momento de transporte. A busca por relatórios nacionais permitiu identificar os métodos que estão sendo utilizados no Brasil, bem como a identificar os dados necessários para aplicação do método proposto no capítulo 3.

Os principais relatórios identificados foram os realizados por D'Agosto *et al.* (2017); IBTS (2019); IPCC (2006); La Rovere *et al.* (2019); Sims *et al.* (2014); Smart Freight Centre (2016), entre diversos outros que permitiram a análise do histórico de IC, conforme apresentado no capítulo 4.

A unidade de medida encontrada na RSL realizada no subcapítulo 2.1.1, emissão de CO₂e por momento de transporte, foi adotada por estudos que utilizaram métodos específicos para o setor de transporte, convergindo com aquela utilizada pelo *International Transport Forum* (ITF) (ITF, 2019), bem como para o cálculo da IE (MJ/t.km ou MJ/p.km) pelo estudo de IBTS (2019) e pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2019), principal estudo utilizado para levantamento de dados, que também utiliza como denominador o momento de transporte.

Como o indicador de IE é considerado como auxiliar na análise que se objetiva realizar neste estudo e devido aos apontamentos realizados no subcapítulo 2.1.1, a unidade de medida kg CO₂e/t.km ou kg CO₂e/p.km foi a escolhida para a elaboração do método proposto no Capítulo 3.

2.2 Base Conceitual

Neste subcapítulo são apresentados conceitos necessários a uma compreensão dos pontos considerados nesse estudo, são eles: (1) Método desenvolvido por Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas; (2) Abordagens *Top-Down* e *Bottom-up*; (3) Método MRV; (4) Indicadores; (5) Análise de Ciclo de Vida; e (6) Métodos de Decomposição.

2.2.1 Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) foi estabelecido, em 1988, pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), com objetivo de estabelecer diretrizes relacionadas a mudança climática global e visando criar uma metodologia para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa. Uma das atividades do IPCC é apoiar a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) por meio do desenvolvimento dessas metodologias.

O IPCC é composto por 195 países membros das Nações Unidas e da Organização Meteorológica Mundial (em inglês, *World Meteorological Organization - WMO*). Desta forma, o IPCC publica relatórios de avaliação que apresentam o quadro atual geral das mudanças climáticas, que são revisados e atualizados desde sua criação. A Figura 5 apresenta os principais relatórios publicados pelo IPCC desde 1990.

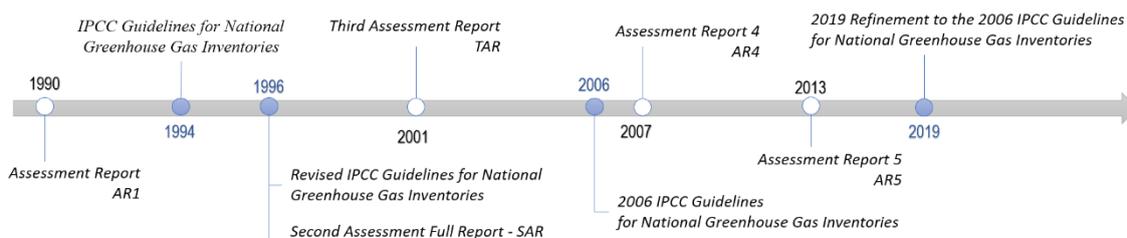


Figura 5: Ordem cronológica dos principais relatórios publicados pelo IPCC

O *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* é versão revisada das diretrizes e métodos publicados em anos anteriores. Este relatório foi dividido em cinco volumes, dos quais o volume dois refere-se ao setor de energia, em que está inserido o subsetor de transporte, que neste estudo será denominado apenas setor de transporte.

No caso do uso combustíveis fósseis, as emissões de outros GEE não-CO₂ (CH₄ e N₂O) são relativamente menores se comparadas ao de CO₂. Desta forma, na abordagem *Tier 1*, estima-se a emissão de CO₂ considerando o teor de carbono contido no combustível, que depende apenas da sua composição, enquanto as emissões dos GEE não-CO₂ dependem de fatores diversos e que precisam de maior conhecimento e disponibilidade de dados, tais como tecnologias utilizadas, manutenção, entre outros, sendo recomendado então o uso do *Tier 3*, ainda que seja possível estimar por *Tier 1*.

Sendo assim, pode-se estabelecer as diferenças entre os níveis para os Fatores de Emissão (FE) necessários para a estimativa das emissões, isto é, entre os *Tiers 1, 2 e 3* (Figura 6).

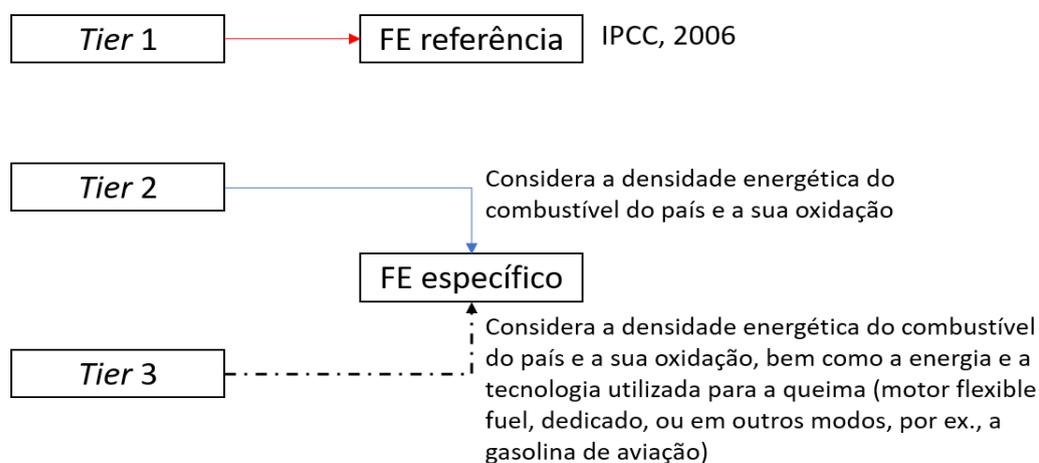


Figura 6: Níveis estabelecidos pelo IPCC, 2006

❖ TIER 1

O *Tier 1* tem como base o consumo de combustível para se estimar as emissões, com dados geralmente provenientes de estatísticas nacionais de energia, e os seus fatores de emissão, que estão disponíveis para todos os GEE relevantes.

A qualidade do uso desses FE depende dos gases que estão sendo considerados no estudo. Para o CO₂, estes fatores dependem do conteúdo de carbono dos combustíveis utilizados. No entanto, quando consideradas as condições em que ocorrem a combustão, tais como eficiência da combustão, retenção de carbono, entre outros, esses fatores não são determinantes.

No entanto, os FE para outros GEE, como CH₄ e N₂O, dependem da tecnologia utilizada para a combustão e as condições operacionais, podendo variar consideravelmente ao longo do tempo. Desta forma, o uso de FE padrão para o cálculo de emissão para estes gases resulta em valores que podem ser incertos.

❖ TIER 2

No *Tier 2*, as emissões provenientes da queima de combustível podem ser estimadas de modo similar àquela realizada no *Tier 1*, no entanto os FE utilizados são específicos para cada país ou região, diferindo, assim, do FE padrão utilizado no *Tier 1*.

Os fatores de emissão específicos para um determinado país, quando disponíveis, diferem para cada combustíveis e tecnologias de combustão utilizadas e, por isso, os dados de atividade poderiam ser mais desagregados de modo a refletir adequadamente essas fontes que também são desagregadas. Sendo assim, se os fatores de emissão disponíveis para um determinado país forem provenientes de dados detalhados sobre o conteúdo de carbono em diferentes lotes de combustíveis usados ou das tecnologias de combustão aplicadas no país, as incertezas da estimativa de emissões serão reduzidas e a tendência é que ela poderá ser estimada de modo mais adequado ao longo do tempo.

Para os GEE não-CO₂ ou aqueles provenientes da oxidação incompleta do carbono tiver suas emissões medidas e documentadas, podem ser considerados neste nível os fatores de emissão específicos do país. Para que esse histórico de medição possa ser considerado válido, é necessário que a metodologia utilizada para a medição seja documentada.

❖ TIER 3

Na abordagem *Tier 3*, são utilizados modelos ou medições de emissões detalhados e dados a nível individual. Desta forma, os modelos e medições devem fornecer estimativas mais precisas principalmente para GEE não-CO₂.

O monitoramento contínuo de emissões provenientes da combustão geralmente não se justifica quando se trata apenas das emissões de CO₂, devido ao custo comparativamente alto. No entanto, poderia ser realizado o monitoramento e medição de outros poluentes, tais como dióxido de enxofre (SO₂) ou óxidos de nitrogênio (NO_x).

Se ao se elaborar um inventário, medições bem documentadas da quantidade de carbono emitida em gases não-CO₂ ou não oxidado estiverem disponíveis, pode ser considerado neste nível os fatores de emissão específicos do país. A documentação de como foram realizadas essas medições deve ser reportada. Ainda, se as estimativas de emissão forem baseadas em medições, elas já incluirão as emissões diretas de CO₂.

Segundo IPCC (2006), particularmente para o transporte rodoviário, o uso de um método específico de tecnologia *Tier 2* ou *Tier 3* para estimar as emissões de GEE não-CO₂ e de Poluentes Atmosféricos (PA) são os que fornecem resultados mais ajustados. No entanto, para a emissão de CO₂, em geral, a aplicação da abordagem *Tier 2*, com base no teor de carbono do combustível, densidade energética e na quantidade de combustível consumida é suficiente para obtenção de resultados adequados.

Os modelos de emissão e os métodos específicos de tecnologia para transporte rodoviário podem ser baseados em quilômetros percorridos ou na quantidade de combustível. se for considerado para o cálculo os quilômetros percorridos, os dados de atividade aplicados em tais modelos e métodos que consideram *Tier 2* ou *Tier 3* devem ser consistentes com os dados de venda combustível, que deverão ser utilizados para estimar as emissões de CO₂ do transporte rodoviário.

Ainda, se for detectada uma discrepância entre as vendas de combustível e o número de quilômetros percorridos, os dados de atividade utilizados no método específico da tecnologia

devem ser ajustados de modo a corresponder às estatísticas de vendas de combustível.

As emissões podem ser estimadas a partir do combustível consumido (representado pelo combustível vendido) ou da distância percorrida pelos veículos. Em geral, a primeira abordagem (combustível vendido) é apropriada para estimar as emissões de CO₂ e a segunda (distância percorrida por tipo de veículo e tipo de via) é apropriada para a estimativa das emissões de CH₄ e N₂O.

2.2.2 *Abordagens Top-down e Bottom-up*

As abordagens *Top-down* e *Bottom-up* são as duas abordagens básicas para examinar os vínculos entre a economia e os setores emissores de GEE específicos, como é o caso do sistema de transportes. A abordagem *Top-down* é um modelo agregado, que avalia o sistema a partir de variáveis econômicas agregadas, aplicando a teoria macroeconômica e as 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).

Desta forma, pode-se considerar que a abordagem *Top-down* é referente ao uso dos FE *Tier 1*, enquanto a abordagem *Bottom-up* está relacionado aos *Tiers 2* e *3*. A aplicabilidade de cada um destes métodos varia entre os países, conforme a disponibilidade de dados e a maturidade tecnológica (IBTS, 2019).

2.2.3 *Método MRV*

O MRV - Medição, Relatório e Verificação (do inglês, *Monitoring, Reporting and Verification*), é um método abrangente, podendo ser aplicado em diversos contextos, especialmente no monitoramento da emissão de CO₂. Além disso, este método é recomendado pelo UNFCCC desde a COP13 (*Conference of Parties*, 13ª edição), em 2007.

Segundo GIZ (2018), a terminologia MRV pode ser interpretada como Monitoramento, Relatório e Verificação, em que a adoção do termo monitoramento é mais adequada que o termo medição, pois os impactos da adoção de medidas de mitigações não podem ser diretamente medidos, mas sim monitorados.

De maneira geral, o método MRV tem como principal finalidade a coleta de informações relevantes sobre o progresso e o impactos de medidas de mitigação, bem como o de apresentar as informações resultantes das medidas de mitigação de forma transparente e padronizada, de modo a avaliar a integridade, consistência e confiabilidade da informação relatada por meio de um processo independente (GIZ, 2018).

A partir desses conceitos, definem-se as fases de medição/monitoramento, que englobam as etapas de: (i) estimativa do *baseline*; (ii) monitoramento da implantação da ação e; (iii) estimativa do cenário futuro. O resultado desta etapa apoia o processo decisório relativo à implantação de medidas de mitigação. Após a determinação da ação a ser implantada, deve-se realizar o seu monitoramento, por meio da coleta de dados de indicadores. Enfim, a estimativa desta ação, no cenário futuro, deve ser realizada após a implantação da ação ou durante um processo de intervenção prolongado (GIZ, 2018).

A Figura 7 apresenta as principais questões a serem abordadas em cada etapa do método MRV.

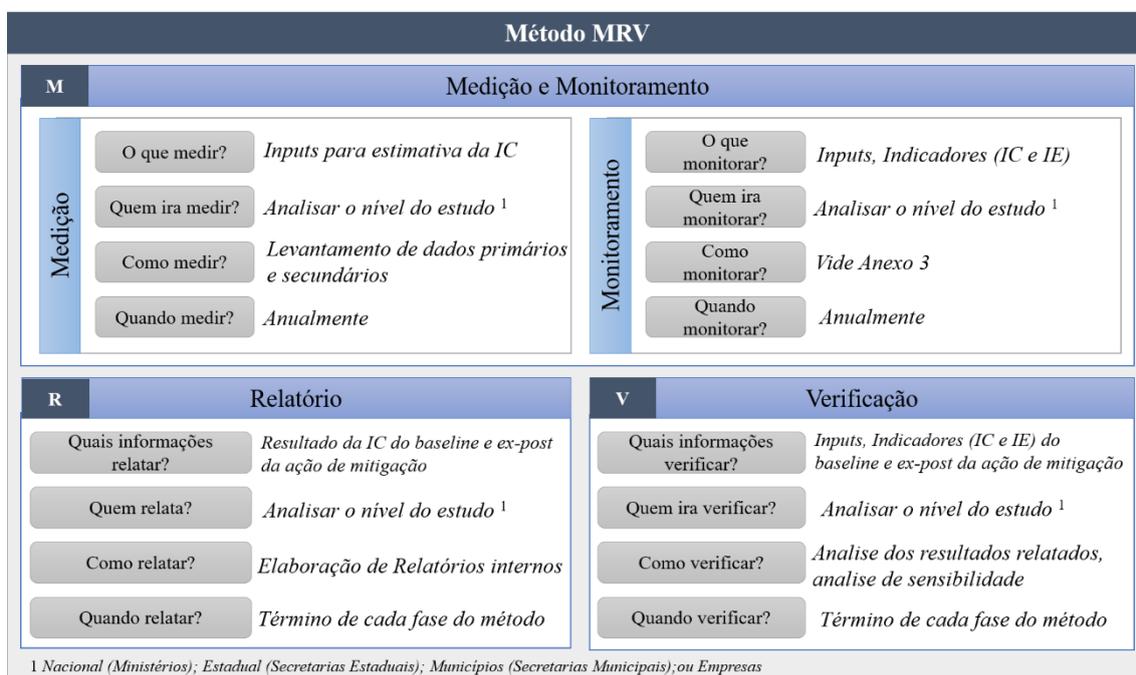


Figura 7: Definição dos termos M-R-V
 Fonte: Elaboração própria com base em (GIZ, 2018)

2.2.4 Indicadores

O uso de indicadores permite avaliar o desempenho dos atributos de um sistema e descrevê-lo de forma específica, por meio de valores que representam um processo ou um resultado, tendo normalmente uma meta associada (Oliveira e D'Agosto, 2017).

Indicadores de intensidade são necessários para se estabelecer comparações e, assim como a IE, os indicadores de IC possuem um numerador, em que é expresso a quantidade de energia ou de carbono e um denominador em que é expressa a atividade econômica ou produto (Eggink, 2013). Sendo assim, de forma análoga à comparação entre empresas, a IC é um indicador que pode ser utilizado para se realizar comparações entre países com diferentes atividades de transporte. Além disso, pode ser um bom indicador a ser considerado para analisar o histórico, a efetividade das medidas de mitigação, e comparar os cenários de base (*baseline*) e prospectivos.

Vale ressaltar que a IE está correlacionada a EE, que é a razão entre a estimativa do momento de transporte e da demanda total de energia. A busca pela redução de emissões está ligada à redução da IE e ao aumento da EE. Esse aumento pode ser alcançado restringindo o crescimento do consumo de energia, de modo que seja possível realizar a mesma quantidade de serviço ou trabalho (GIZ, 2018).

A IE e a IC do setor transporte são resultado dos efeitos combinados da tecnologia dos veículos, das diferentes fontes de energia utilizadas, da carga dos veículos, do tráfego e da divisão modal (Kamakaté e Schipper, 2009).

Segundo Price *et al.* (2013), as unidade de medida de nível macro do indicador de IC, tal como emissões de CO₂ por unidade de PIB ou *per capita*, podem ser agregados demais para serem medidas significativas e, por isso, não fornecem nenhuma indicação em que ponto ocorrem ineficiências ou em que ponto a aplicação de uma ação é necessária. Em vez disso, os indicadores baseados nos setores de uso final de energia, tal como o setor de transporte, poderiam oferecer uma melhor abordagem, que permitam definir políticas de baixo carbono e promover ações para reduzir as emissões de carbono relacionadas ao uso de energia (Price *et al.*, 2013).

Para suprir essa lacuna, foi realizado como procedimento metodológico a RSL para identificar na literatura as unidades de medida utilizadas para a IC, como apresentado no subcapítulo 2.2.

Além disso, buscou-se por estudos que tratassem dos métodos existentes para sua estimativa. Após a revisão, será realizada uma pesquisa documental com objetivo de levantar os dados necessários para a estimativa da IC, que poderá ser realizada após a aplicação do método que será proposto, apresentado no capítulo 3.

O consumo de energia por p.km ou t.km é a medida comparativa mais útil para obter a eficácia de um serviço/rota e para a comparação com outros modos de transporte, sendo também um fator explicativo para comparação da eficiência do veículo entre frotas (GIZ, 2018). Desta forma, a IE é um indicador que será utilizado para auxiliar a análise do histórico da IC do subsetor de transportes.

2.2.5 *Análise de Ciclo de vida*

O conceito de Análise de Ciclo de Vida (ACV) foi estabelecido pela ISO 14040, quando foi criada em 2006, e que teve sua última revisão elaborada em 2016. A ISO 14040 definiu a ACV como a “compilação e avaliação das entradas e saídas e dos potenciais impactos ambientais de um sistema de produtos ao longo de seu ciclo de vida”, isto é, desde a sua extração até a sua disposição final, também conhecido como análise “do berço ao túmulo”.

O Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (Ibict) desenvolve um projeto de Análise de Ciclo de Vida por meio do fomento dessa metodologia, por meio de disponibilidade de uma infraestrutura de informação que permita o atendimento à indústria, à academia e à sociedade em geral. Ainda, o Ibict define a ACV como uma técnica que permite a mensuração dos possíveis impactos ambientais provenientes da fabricação e utilização de determinado produto ou serviço (Ibict, [s.d.]). Isto é, essa definição estende o conceito, que passa a abranger também aos serviços.

A processo para realizar um ACV pode ser apresentada de forma genérica em três etapas (Figura 8), são elas: a definição do objetivo e escopo da análise, em que devem ser determinados os limites da análise; o Inventário de Ciclo de Vida, em que devem ser levantados todos os fluxos do processo, incluindo os recursos de entrada e de saída, tal como resíduos e poluição; e Avaliação de impacto, em que os dados obtidos no inventário devem ser convertidos em resultados de impacto, isto deve ser realizado por meio do uso de algoritmos ou indicadores apropriados, que permitem quantificar a sobrecarga ambiental (Horne *et al.*, 2009).

Por fim, na interpretação dos dados, busca-se identificar as principais questões da análise, bem

como checar a integridade, a sensibilidade e a consistência dos resultados e definir as conclusões, as limitações e as recomendações do estudo (Ibict, [s.d.]).



Figura 8: Processo para ACV

Fonte: Elaborado pela autora, com base em (Horne *et al.*, 2009)

De acordo com Rajagopal *et al.* (2017), as emissões do ciclo de vida referem-se a todas as emissões, direta ou indiretamente associadas ao consumo (ou produção) de um bem, atividade ou serviço específico.

Desta forma, o método ACV quando aplicado ao consumo de energia pelo setor de transportes pode considerar a emissão de GEE de três delimitações da ACV, como apresentado na Figura 9.

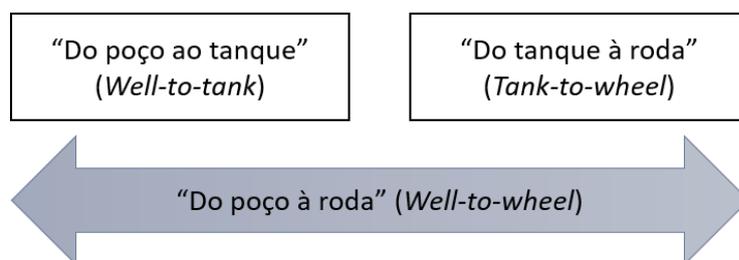


Figura 9: Delimitações ACV para o setor de transporte

A operação do transporte, em que há o consumo final de energia e emissões veiculares, utiliza-se comumente a delimitação “do tanque à roda” (Tank-to-Wheel - TTW), enquanto que, quando se trata da extração, produção, do fornecimento de energia, e distribuição é considerada a delimitação “Do poço ao Tanque” (Well-to-tank - WTT). O consumo total de energia e de emissões é considerado a soma das duas delimitações anteriores, isto é, “Do poço à roda” (Well-to-Wheel - WTW) (Smart Freight Centre, 2016).

Vale ressaltar que a utilização da eletricidade como fonte de energia para o transporte no seu uso final, não produz emissão de GEE ou de poluentes atmosféricos. No entanto, deve-se considerar a matriz energética na geração de energia do país em que está sendo realizado o estudo, bem como a emissão a transmissão e distribuição desta energia, isto é, deve-se considerar o ciclo de vida. Desta forma, a emissão só poderá ser considerada zero na utilização de veículos elétricos se a geração dessa energia elétrica for proveniente de fontes renováveis e limpas, tais como energia hidrelétrica, solar, eólica etc.

2.2.6 Métodos de decomposição

Os conceitos abordados neste subcapítulo referem-se aos métodos de decomposição identificados na RSL, apresentado no item 2.2.1 para que se tenha uma melhor compreensão deste capítulo.

De acordo com Xu *et al.* (2016), dois métodos principais são usados para análise de decomposição, eficaz na quantificação dos fatores que afetam as emissões de carbono, são eles: a análise de decomposição estrutural (*Structural Decomposition Analysis* - SDA) e a análise de decomposição de índice (*Index Decomposition Analysis* - IDA).

Ainda, o IDA pode ser dividido nos métodos *Laspeyres Index* e *Divisia Index*. O *Laspeyres Index* mede a variação percentual de itens ao longo do tempo e usa pesos que são baseados em valores relativos ao período base, enquanto o *Divisia Index* é uma soma ponderada de taxas de crescimento logarítmicas, em que os pesos são as partes dos componentes do valor total (Xu *et al.*, 2016).

Uma limitação da utilização dos métodos SDA e do IDA é que estes métodos não oferecem uma decomposição exata, resultando num termo residual, que dificulta a interpretação dos resultados (Francisco, 2015).

O método *Divisia Index* foi estendido em um novo método, o *Logarithmic Mean Divisia Index* (LMDI) (Wang *et al.*, 2016). Este método possui adaptabilidade, facilidade de uso e na interpretação dos resultados (Ang, 2004). A Figura 10 apresenta um esquema simplificado da evolução desses métodos de decomposição.

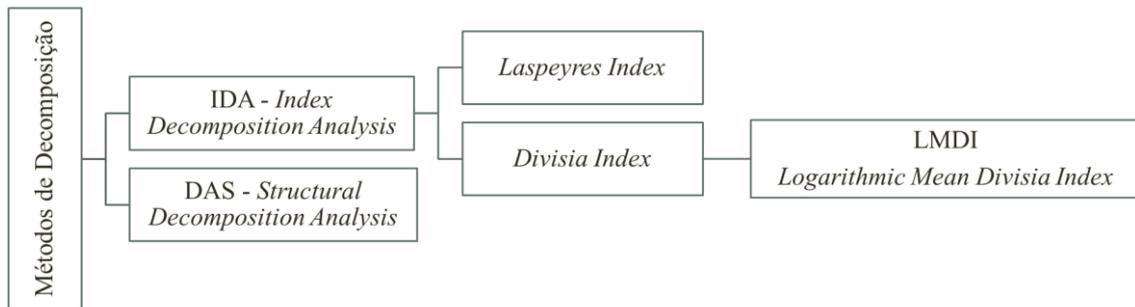


Figura 10: Métodos de decomposição

A equação de *Kaya* é a base para o método LMDI e permite a decomposição das emissões de CO₂ nos fatores que influenciam o consumo de energia e a IC. A modelagem baseada na equação de *Kaya* possui grande utilidade ao permitir o cálculo das emissões (relacionadas à energia) a partir das previsões existentes das taxas de crescimento populacional, de PIB *per capita*, de consumo energético por unidade de PIB e de emissões de CO₂ por unidade de energia. Assim, a equação de *Kaya* tem sido utilizada para projetar as emissões futuras de GEE em diversas projeções climáticas, inclusive aquelas realizadas pelo IPCC (GVces, 2015).

O método LMDI pode ser utilizado para a decomposição de conjuntos de dados incompletos e, além disso, não apresenta resíduo nos resultados e pode ser usado para decomposições multiplicativas ou aditivas, em que as decomposições multiplicativas consistem na decomposição da mudança da proporção dos fatores, enquanto as decomposições aditivas decompõe a quantidade de mudança nos próprios fatores (Ang, 2005).

No entanto, Segundo Jiang *et al.* (2019), os resíduos encontrados na utilização dos métodos são um dos maiores desafios no desenvolvimento de novas técnicas de decomposição, que pode ocorrer na combinação de dois métodos, na tentativa, por exemplo, de ultrapassar a limitação da quantidade de fatores que podem ser decompostos utilizando-se apenas um método de decomposição, como LMDI.

3 PROPOSTA DE PROCEDIMENTO

Neste capítulo será apresentado o procedimento desenvolvido para o cálculo da IC do setor de Transporte. O procedimento consiste em cinco fases, são elas a saber: (1) Coleta de dados; (2) Fator de Emissão (FE) e Fator de Escala (Fe); (3) Cálculo de Emissões; (4) Verificação e

Cálculo da IC; e (5) Análise qualitativa e quantitativa. O procedimento do método desenvolvido é apresentado no esquema geral da Figura 11

A IE será um indicador auxiliara na análise do histórico da IC para o setor de transporte, de modo a permitir uma melhor compreensão da aplicação de tecnologias alternativas

O método desenvolvido e apresentado neste estudo teve como base os artigos levantados na RSL, descrita no subcapítulo 2.1.1, e nos relatórios levantados na Pesquisa Documental descrita no subcapítulo 2.2.2. Os fatores de emissão seguem a metodologia desenvolvida em IPCC (2006) e Smart Freight Centre (2016).

O método de cálculo do momento de transporte proposto neste estudo teve como base os estudos de GIZ (2018) e D'Agosto *et al.* (2018), enquanto a estimativa do consumo de energia e de emissão de GEE foi com base no estudo de IBTS (2019), bem como aquelas fornecidas pela Empresa de Pesquisa Energética no Balanço Energético Nacional (EPE, 2019). O cálculo de CO₂e é realizado com base no Potencial de Aquecimento Global – *Global Warming Potential* GWP (IPCC, 2016).

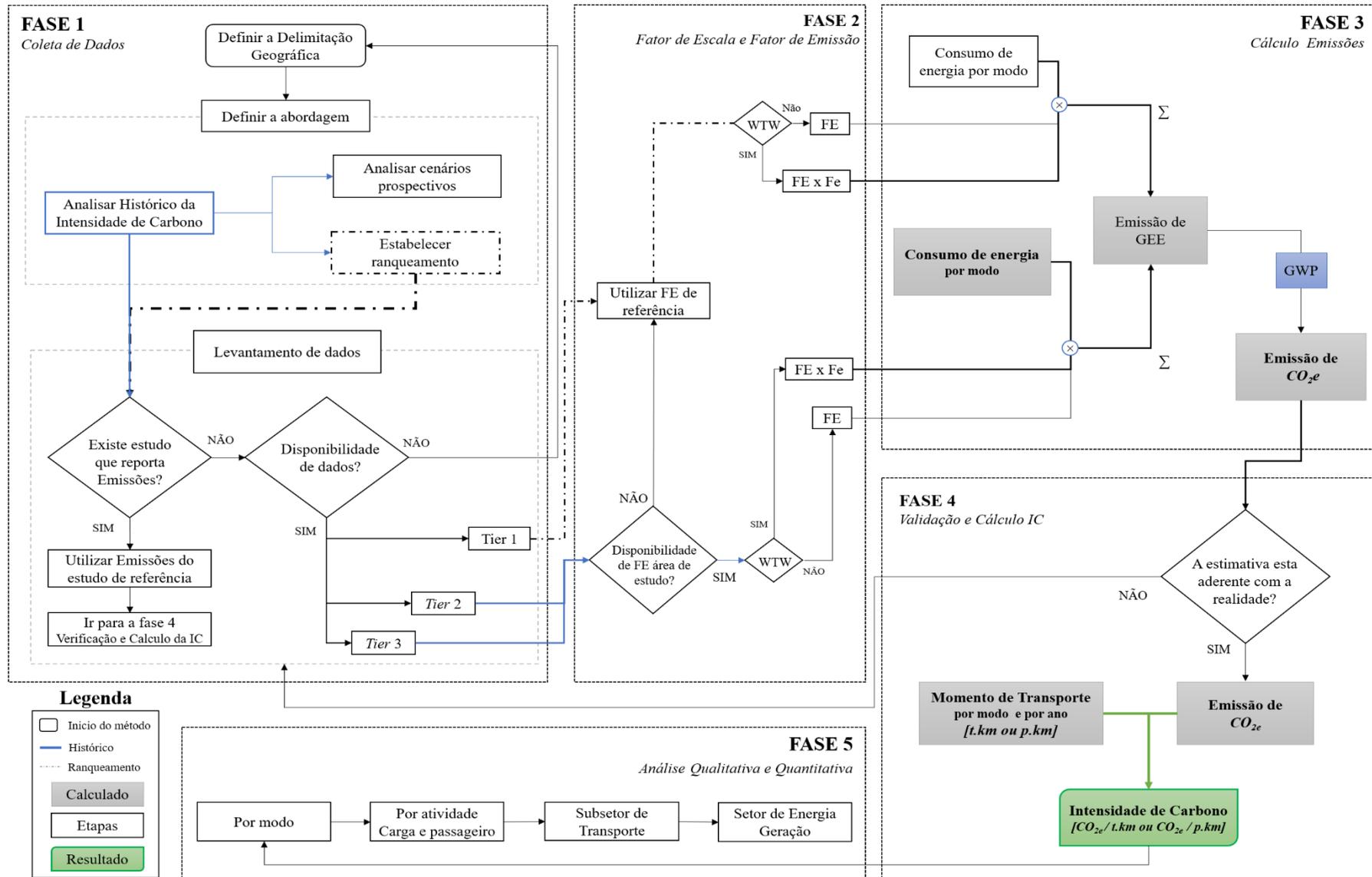


Figura 11: Metodologia proposta para o cálculo da IC do setor de transporte
 Fonte: Elaborado pela autora com base em Gonçalves e D'Agosto (2017); IBTS (2019); IPCC (2006)

3.1 Fase 1: *Coleta de dados*

A Fase 1 divide-se em três etapas que buscam estabelecer: a delimitação geográfica em que será aplicada a metodologia proposta; a abordagem que será utilizada e a disponibilidade e levantamento de dados.

A primeira etapa consiste em estabelecer qual a delimitação geográfica da análise (país ou entidade subnacional) será utilizada na aplicação, de modo a seguir para as etapas seguintes. Esta metodologia, se adaptada, pode ser aplicada também em empresas. Na segunda etapa, define-se a abordagem, que pode ser: (1) a análise do histórico da IC do setor de transporte; (2) o ranqueamento, considerando a IC de outros países, ou de outras cidades/regiões; e (3) a análise de cenários prospectivos.

A análise do histórico da IC permite a melhor compreensão da evolução das emissões de GEE da atividade de transporte durante os anos e, dependendo da abordagem utilizada, permite identificar os pontos críticos em que serão necessárias aplicação de medidas de mitigação para a redução dessas emissões. Vale ressaltar que a análise desse indicador para o setor de transporte deve ser realizada em conjunto com outros indicadores para que estes possam orientar a tomada de decisão na escolha das medidas de mitigação mais adequadas e de onde aplicá-las.

A compreensão do histórico da IC para o setor de transportes permite, ainda, definir o cenário base e, então, traçar diferentes cenários prospectivos, em que é possível considerar a aplicação de diferentes medidas de mitigação. Além disso é possível traçar um histórico se houve monitoramento e relato das emissões, considerando também a análise do setor que está provocando variação nas emissões. Isto é, se há aplicação do método MRV, com o monitoramento anual e a elaboração de relatórios, a definição de um histórico seria naturalmente construída.

O cálculo da IC do setor de transporte, se utilizada uma unidade medida padrão, permite a realização de uma análise comparativa e o ranqueamento da matriz energética de cada país e como essa matriz influencia a emissão de GEE da atividade de transporte. Entender as diferenças entre os países pode ser interessante para que a partir da análise de boas práticas adotadas em outros países, essas possam adaptadas para o país ou entidade subnacional em estudo.

Para a análise do histórico, deve-se estabelecer a delimitação temporal do estudo, isto é, o

período que será analisado, de acordo com a disponibilidade de dados. Se o objetivo do estudo for estabelecer um ranqueamento entre países, deve-se realizar a delimitação espacial dos estudos, isto é, quais países serão considerados na análise. Esse raciocínio é análogo para aplicação do método no ranqueamento entre cidades/região.

A análise de cenários prospectivos está relacionada a elaboração de premissas que consistem na manutenção das ações existentes (*baseline*) ou na inserção de novas medidas de mitigação e qual o impacto delas na IC no futuro. Essas premissas são estabelecidas quando o histórico é bem compreendido, porém necessitando de uma análise das tendências nacionais e internacionais.

A terceira etapa desta fase trata do levantamento de dados, e busca identificar qual a disponibilidade de dados para o estudo. Sendo assim, deve-se, primeiramente, estabelecer se o país ou entidade subnacional relata as suas emissões por meio da elaboração de um Inventário de Emissões. Se há um Inventário de Emissões para o local de estudo, deve-se utilizá-lo como referência para as emissões (ou para ser utilizado para validação das emissões calculadas) e, em seguida, para o cálculo da IC (fase 4).

Se não houver um Inventário de Emissões, as emissões de GEE deverão ser calculadas a partir do levantamento de dados de consumo de energia para cada modo, tipo de tecnologia utilizada e atividade de transporte. Além disso, deve-se identificar a disponibilidade de Fatores de Emissão específicos do local de estudo, seguindo-se as abordagens em *Tiers* 1, 2 ou 3.

Na abordagem *Tier* 1 (ou 2) são utilizados dados agregados (*Top-down*). Essa abordagem é amplamente aplicada para dados em nível de país e, conforme observado na realização da RSL, essa abordagem foi considerada em mais da metade dos estudos identificados.

Na abordagem *Bottom-up*, com a utilização de FE *Tier* 3, como apresentado no subcapítulo 2.1.2, utiliza-se dados desagregados, permitindo análises em que se busca ter maior sensibilidade quanto aos fatores responsáveis pela variação da emissão dos GEE.

A análise prospectiva deve levar em consideração as tendências da aplicação de medidas de mitigação da emissão de GEE, tais como: a eletrificação da frota ou o aumento do uso de biocombustíveis. Neste caso o ideal é realizar a análise do histórico quando utilizada a abordagem *Bottom-up* (*Tier* 3), de modo a obter uma estimativa que permita maior sensibilidade para análise. Para que isto se torne mais claro, a Tabela 2 apresenta os dados de entrada

necessários para a utilização de cada abordagem supracitada.

Tabela 2: Dados de entrada necessários à determinação da abordagem a ser utilizada

Dados de entrada (unidade)	<i>Top-down</i>		<i>Bottom-up</i>
	<i>Tier 1</i>	<i>Tier 2</i>	<i>Tier 3</i>
Consumo de energia por modo e tipo de energia (Joule)	✓	✓	✓
Divisão modal de viagens (%)		✓	✓
Distância média de viagem (km)		✓	✓
Coefficiente de consumo de energia (l/km ou m ³ /km)			✓
Frota circulante (unid.)			✓
Intensidade de uso (km)			✓
Carregamento médio (passageiro ou tonelada de carga)			✓

Fonte: Elaboração própria com base em GIZ (2018) e IPCC

Se não houver dados disponíveis, será necessário reiniciar o método, estabelecendo novamente o escopo do estudo, a abordagem e os dados.

3.2 Fase 2: *Fator de Escala e Fator de Emissão*

A Fase 2 consiste em estabelecer se existe um Fator de Emissão específico utilizado para o cálculo da emissão de GEE no país ou região de estudo. Se não houver a disponibilidade do FE específico para a região de estudo, utiliza-se FE de referência, isto é, deve-se utilizar um fator genérico fornecido pelo IPCC (2006) ou realizar a coleta dos dados necessários à aplicação do método.

No caso em que há disponibilidade do uso de FE determinado para o país ou entidade subnacional de estudo, deve-se considerar, ainda, se este considera o ciclo de vida para a energia utilizada. Se a análise considera o ciclo de vida e a emissão de GEE não-CO₂, utiliza-se então, este FE específico. Caso contrário, deve-se utilizar um Fator de Escala (F_e), com acréscimo para os combustíveis fósseis e decréscimo para biocombustíveis, devido à captura de carbono. Esse fator permite encontrar a emissão de GEE considerando a análise de ciclo de vida e os demais GEE não-CO₂, quando se considera o GWP para o cálculo do CO₂e.

3.3 Fase 3: Cálculo Emissões

O procedimento estabelecido na Fase 3 trata do cálculo das emissões a partir do levantamento dos dados de consumo de energia, ou do seu cálculo (Apêndice 2), para o caso da abordagem *Bottom-up*, e dos FE.

Vale ressaltar que a abordagem *Bottom-up (Tier 3)* é majoritariamente aplicada para o modo rodoviário devido à diversidade de tecnologias utilizadas, havendo necessidade de detalhamento na abordagem para que se possa avaliar a contribuição de cada uma delas. A abordagem *Top-down (Tier 1 e 2)* permite estimar de forma eficaz as emissões para os demais modos (aéreo, aquático e ferroviário), pois estes modos utilizam uma ou duas fontes de energia. Esta abordagem também deve ser utilizada para o modo rodoviário no sentido de validar os resultados, como será discutido no subcapítulo 3.4, em que é abordada a fase 4 do método proposto.

O cálculo das emissões de CO₂, CH₄ e N₂O é realizado a partir da equação 1.

$$E_{\omega,m,a} = \sum CE_{\omega,m} * FE_{\omega} \quad (1)$$

Em que, $E_{\omega,m,a}$ Emissão da fonte de energia (ω) de um modo de transporte (m) no ano (a);

$CE_{\omega,m}$ Consumo de energia de uma fonte de energia ω (gasolina, diesel, eletricidade etc.) por um modo de transporte (m);

FE_{ω} Fator de Emissão da fonte de energia (ω); e

ω Tipo de fonte de energia.

A partir do cálculo de emissões para ao GEE, deve-se utilizar o GWP (IPCC, 2016) para estimar as emissões de CO₂e. Os valores do FE e do GWP utilizados são apresentados no Apêndice 1.

Quando utilizado um FE de combustível que não inclui as emissões de WTW, deve-se aplicar um Fe para correção desses valores. Vale ressaltar que, enquanto os combustíveis líquidos e gasosos para transporte emitem na fase de produção e de uso, as emissões de eletricidade ocorrem apenas na fase de geração (Smart Freight Centre, 2016).

Para a análise por modo de transporte e por atividade (passageiros e carga), as emissões serão calculadas considerando a delimitação da ACV correspondente a etapa WTW. No entanto, para os biocombustíveis serão consideradas emissão zero de CO₂, sendo consideradas apenas as emissões dos gases não-CO₂. A análise realizada para todos os modos, por atividade (passageiro

e carga), do setor de transporte, considera as emissões de CO₂ do uso final dos biocombustíveis.

As emissões para todo ciclo de vida são calculadas a partir dos FE específicos apresentados no Apêndice 1, possibilitando a análise da geração de energia em comparação com as emissões do uso final. Esses pontos serão detalhados no subcapítulo 3.4.

3.4 Fase 4: Validação e Cálculo IC

A fase de validação é necessária para se garantir a consistência dos dados. Dessa forma, as emissões estimadas por meio da abordagem *Top-down*, com base em dados fornecidos por relatórios nacionais de balanço de energia para o consumo de energia e fatores *Tier 1*, devem ser comparadas com estimativas que utilizem abordagens *Tier 2* e/ou 3 quando existentes, para cada modo. Para validar essas abordagens específicas, as emissões, mesmo que apresentem diferenças nos valores, devem apresentar as mesmas tendências de crescimento e redução da abordagem *Top-down* ao longo do período analisado.

Se a estimativa das emissões com base em dados nacionais e nos FE genéricos do IPCC for comparada com a estimativa de algum relatório de referência que também utiliza a abordagem *Tier 1*, os resultados não devem apresentar nenhuma diferença percentual.

A partir da validação, utiliza-se as emissões validadas que tenham a abordagem mais específica para o cálculo da IC. Para tal é necessário estimar o momento de transporte por modo e por atividade (passageiros e carga). O método para a estimativa do momento de transporte pelas abordagens *Top-down* e *Bottom-up* é apresentado no Apêndice 2.

3.5 Fase 5: Análise Qualitativa e Quantitativa

A análise consiste em identificar e compreender fatos ocorridos durante o período de estudo que implicaram na redução ou aumento da IC no subsetor de Transporte no Brasil. Primeiro, identifica-se os pontos críticos da IC ao longo do período de estudos. Esses pontos são, de modo geral, picos gerados por elevados aumentos e/ou reduções acentuadas da IC. Após identificados esses pontos, bem como as tendências, investiga-se as causas, por meio de relatórios oficiais, artigos e, até mesmo notícias em jornais, que possam apontar para possíveis marcos históricos que promoveram mudanças de mercado ou do sistema de transporte, medidas de mitigação

adotadas, e fatos políticos que tenham impactado na IC do transporte de carga e passageiro no período do estudo, bem como possíveis inconsistências dos dados.

Vale ressaltar que a outros indicadores podem ser utilizados como auxiliares na análise dos modos, de modo a permitir uma melhor compreensão das variações da IC do setor de transporte devido à entrada de tecnologias alternativas, como por exemplo o indicador de IE.

No entanto, deve-se considerar que o “princípio de que a soma de componentes individuais deve ser igual ao total real, sem exclusão ou duplicação de certos componentes, é fundamental para o desenvolvimento de um inventário de emissões” (Smart Freight Centre, 2016). Desta forma, se a análise visa um relato de emissões multisetorial, deve evitar a dupla contagem.

Sendo assim, no caso da utilização de biocombustíveis, na análise é desconsiderada as emissões de CO₂ do uso final específica de cada modo e atividade quando há utilização de biocombustíveis, deve ser desconsiderada as emissões de CO₂ no uso final, sendo consideradas apenas as emissões de CH₄ e N₂O. De acordo com IPCC (2006), as emissões de CO₂ da combustão de biocombustíveis devem ser consideradas pelo setor AFOLU (em inglês, *Agriculture, Forestry and Other Land Use*) e devem ser relatadas separadamente. Essa abordagem também está alinhada com os estudos de D’Agosto *et al.* (2017); IBTS (2019); MCTI (2016).

4 APLICAÇÃO E ANÁLISE

Neste Capítulo será apresentada a aplicação do método para a IC dos modos, nos subcapítulos 4.2.1 a 4.2.3.3, a IC do setor de transporte, no subcapítulo 4.3, e uma análise do setor de energia e da IC do setor de transporte considerando o ciclo de vida, no subcapítulo 4.4.

Este estudo tem como limitação geográfica o nível de país, objetivando a apresentação e análise quantitativa e qualitativa do histórico de IC do setor de transporte para o Brasil, por modo e por atividade (carga e passageiro) para o período compreendido entre 1990 e 2018, bem como uma análise global para o setor de Transportes.

De modo geral, utiliza-se os Fatores *Tier 1* do IPCC e o consumo de energia reportado no Balanço Energético Nacional para o período compreendido entre os anos 1990 e 2018, para se estimar as emissões por meio da abordagem *Top-down* e, em seguida, comparando-as com as emissões estimadas no relatório elaborado por IBTS (2019) ou pelas emissões calculadas a partir de FE *Tier 2*, buscando a validação dos resultados. As emissões reportadas por IBTS (2019) variam a abordagem (*Tiers 1, 2 e 3*) dependendo do modo de transporte analisado.

Os Fatores de Escala (Fe) são apresentados no Apêndice 1 e são considerados para o cálculo das emissões equivalentes e na análise do ciclo de vida, apresentada no subcapítulo 4.4.2.

A análise, por modo para passageiro e carga, é realizada considerando a necessidade do relato multisetorial das emissões para atendimento da NDC. Sendo assim, essa análise do histórico de IC do transporte para o Brasil só considera o uso final e não considera as emissões da etapa WTT do ciclo de vida, para evitar a dupla contagem do transporte e distribuição dos combustíveis e biocombustíveis. O caso da eletricidade é simples de ser compreendido, sua emissão no uso final é zero e a emissão na sua geração é reportada pelo subsetor de geração de energia (setor de energia).

Vale ressaltar que, o transporte dutoviário de carga por não foi considerado na análise por modo, pois utiliza de eletricidade para a movimentação da carga e, desta forma, não emite GEE quando considerada a análise TTW.

Na análise da IC total do setor de transporte (IC_{TTW}) considera que as emissões de CO₂ do uso final dos biocombustíveis serão contabilizadas e analisadas no histórico de IC total para o setor de Transportes, e que será comparada com a IC que considera todo o ciclo de vida da energia

utilizada, inclusive da eletricidade (IC_{WTW}). Essas IC, principalmente a IC_{WTW}, são analisadas neste estudo de modo isolado, que permita uma comparação entre elas e para que seja possível uma melhor compreensão dos impactos da adoção de biocombustíveis e, portanto, não devendo ser reportadas para evitar a dupla contagem das IC de outros setores.

Na aplicação são apresentadas apenas as fases 1 e 2, com a Coleta de dados e cálculo das emissões de forma conjunta, sem um subcapítulo separado para os Fatores de escala e de emissão, já definidos genericamente acima e abordados de forma específica durante a aplicação. Além disso, serão apresentadas as fases de Validação e Cálculo da IC e da Análise separadamente.

4.1 Rodoviário

O modo rodoviário é o mais complexo, se comparado aos outros modos, quando se trata de fontes de energia e tecnologias utilizadas. No Brasil, os principais combustíveis e biocombustíveis utilizados atualmente e que são analisados neste estudo são apresentados na Tabela 3.

Atividade	Combustível	
Passageiro	Gasolina C	Gasolina A
		Etanol Anidro
	Gasolina A	Etanol Hidratado
		GNV
Carga	B10	Diesel mineral Biodiesel

Tabela 3. Principais combustíveis utilizados no modo rodoviário, por atividade, no Brasil
Fonte: Elaboração própria

4.1.1 Coleta de dados e Cálculo das emissões

O Inventário Nacional de Emissões, elaborado por MMA (2014) classifica as categorias de veículos como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Categoria de veículos rodoviários

Categoria	Combustível (motor)
Motocicletas	Gasolina
	<i>Flexible Fuel</i>
Automóveis	Gasolina
	Etanol
	<i>Flexible Fuel</i>
	GNV
Comerciais leves	Gasolina
	Etanol
	<i>Flexible Fuel</i>
Micro-ônibus	
Ônibus urbanos	
Ônibus rodoviários	
Caminhões semileves (PBT > 3,5 t. < 6 t.)	Diesel
Caminhões leves (PBT ≥ 6t. < 10 t.)	
Caminhões médios (PBT ≥ 10 t. < 15 t.)	
Caminhões semipesados (PBT ≥ 15 t.; PBTC < 40 t.)	
Caminhões pesados (PBT ≥ 15 t.; PBTC ≥ 40 t.)	

Fonte: Elaboração própria com base em (MMA, 2014)

Legenda: PBT – Peso Bruto Total

PBTC - Peso Bruto Total Combinado

Desta forma, o cálculo das emissões de CO₂ para modo rodoviário foi realizado com base na abordagem *Tier 1* e no consumo de energia obtido no BEN. Para a estimativa do CO_{2e}, foram considerados os fatores de GWP, obtidos no *Fifth Assessment Report* (IPCC, 2014), como apresentado no Apêndice 1.

4.1.2 Validação e Cálculo da IC

A partir do cálculo das emissões e dos dados de emissão apresentados no relatório elaborado por IBTS (2019), estimados a partir de uma abordagem *Bottom-up* (*Tier 3*) para CH₄ e N₂O e utilizando-se o GWP para a estimativa do CO_{2e}, pode-se validar as emissões. As emissões estimadas por meio da abordagem *Bottom-up* foram validadas para o modo rodoviário, pois apresentam a mesmas tendências das emissões calculadas com base no FE *Tier 1*, conforme apresentado na Figura 12.

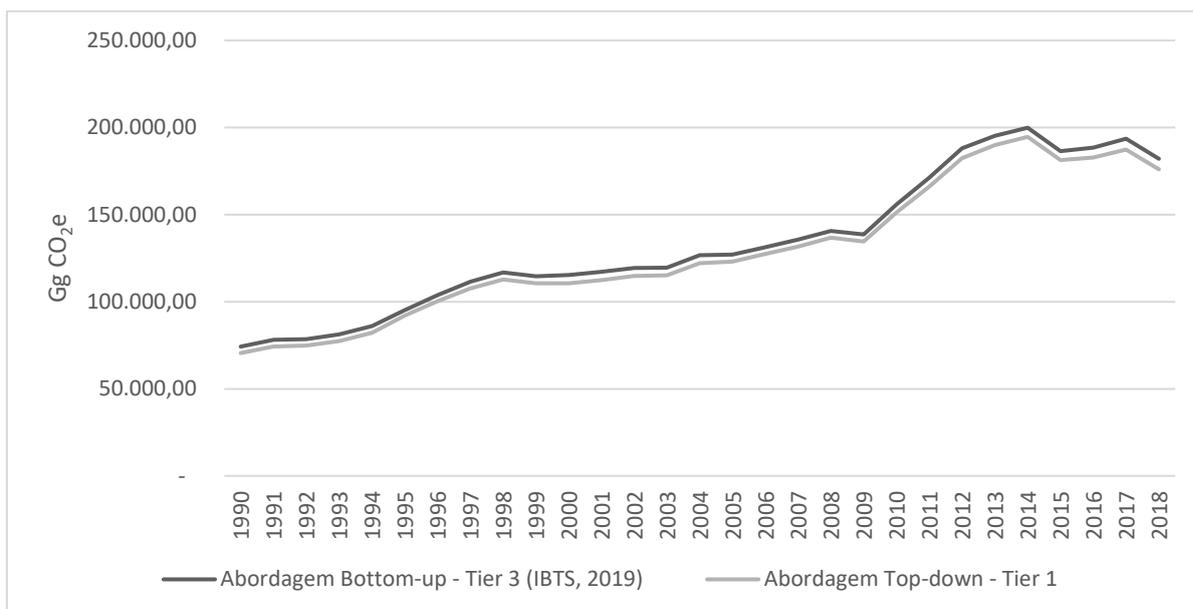


Figura 12: Gráfico comparativo de emissão de CO₂e do modo rodoviário

A partir das emissões calculadas por meio da abordagem *Bottom-up* e do momento de transporte, obtidos de IBTS (2019), foi possível calcular a IC do transporte rodoviário de carga e passageiros.

4.1.3 Análise Qualitativa e Quantitativa

A IC do transporte rodoviário de carga é apresentada na Figura 13. O período entre 1990 e 1998 apresenta um crescimento da IC do transporte rodoviário de carga, devido a um aumento mais expressivo do consumo de energia, 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 do transporte 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 do sistema.

Além disso, houve uma deterioração das rodovias devido à redução dos investimentos na infraestrutura rodoviária a partir da década de 70 até 1998, quando foi extinto o Fundo Nacional Rodoviário (DNIT, [s.d.]). As rodovias em estado precário de conservação promove a baixa eficiência do sistema e aumento dos custos de operação (Bartholomeu e Filho, 2008). Segundo (CNT, 2017), em 2017, 12,3% das rodovias são pavimentadas, sendo que dessas, 48,3% possui pavimento de qualidade regular, ruim ou péssimo. Esse percentual de pavimentação segue a

média histórica de 13% de pavimentação das rodovias (MTPA, 2018). Sendo assim, a partir de 1993, iniciou-se a concessão de rodovias (ANTT, [s.d.]), retirando do Estado a responsabilidade de investimento na construção e manutenção da vias.

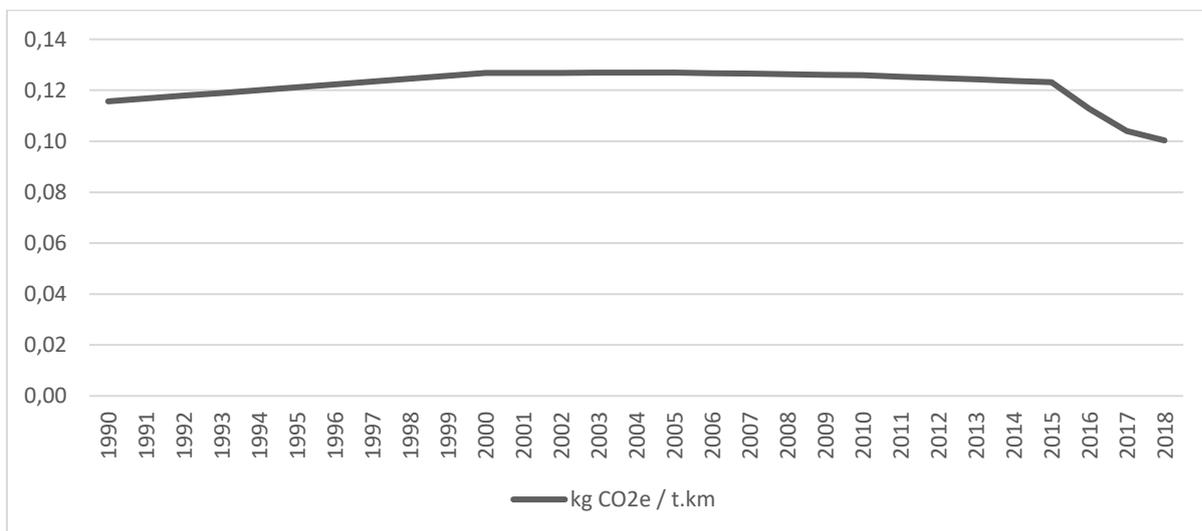


Figura 13: IC do transporte de carga do modo rodoviário

O crescimento da IE (Figura 14) no período até 2015, bem como da IC durante a década de 90, pode ser explicada devido um considerável aumento na venda de veículos comerciais leves e caminhões semileves e leves a diesel e, conseqüentemente, da sua frota. Além disso, devido à menor capacidade, possuem menor EE, apresentando maior IE, enquanto para as outras categorias de veículos, a frota sofre variações, mas não tende a um crescimento significativo ao longo dos anos (Almeida *et al.*, 2017).

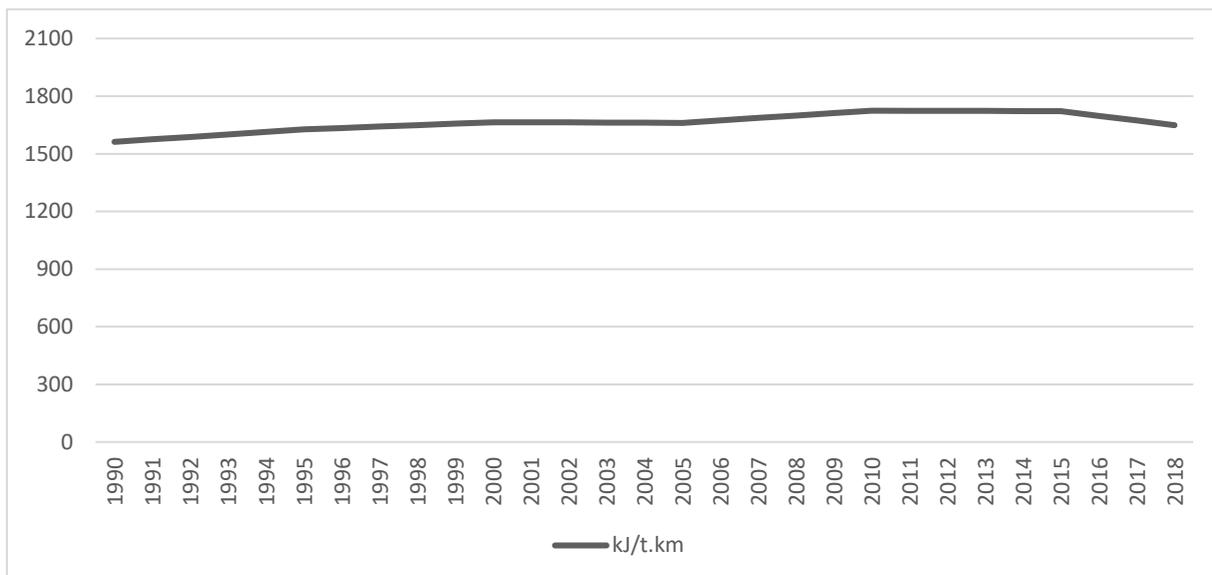


Figura 14: IE do transporte de carga do modo rodoviário

De acordo com Almeida *et al.* (2017), o aumento da frota dos Veículos Leves (VL), composta por comerciais leves, caminhões semileves e leves, ganhou maior participação em 1999, de 60%, e de 67,2% em 2016. Além disso, houve crescimento na frota dos veículos pesados a partir do final da década de 80, nivelando-se às frotas de veículos leves e semipesados no ano de 2016.

Essas variações podem ser decorrentes de diversas imposições do Poder Público, sobretudo na restrição de caminhões no Transporte Urbano de Carga (TUC), tais como proibições de estacionamentos, a restrição de acessibilidade e de limitações às operações de carga e descarga no centro das cidades brasileiras. 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).

Os Municípios estabelecem diferentes restrições e critérios para suas áreas urbanas, dificultando uma análise global para o transporte de carga no Brasil. Entretanto, as restrições poderiam explicar o aumento dos VL na frota, devido ao fato delas serem destinadas aos caminhões com maior PBT – médios, pesados e semipesados. Esse fato pode estar diretamente ligado ao aumento expressivo da venda e da frota de VL a partir desse ano no Brasil. Segundo Almeida *et al.* (2017), o segmento de VL foi a porta de entrada para marcas chinesas a partir do ano de 2006, aumentando a competição entre as principais montadoras presentes no Brasil.

Os municípios do Rio de Janeiro e São Paulo, por exemplo, tem restrição para Veículos Urbanos de Carga (VUC), permitindo apenas a entrada de caminhões semileves e leves em áreas urbanas. Em São Paulo, as restrições são estabelecidas no Decreto Municipal nº 37.185/1997, enquanto as normas para o trânsito de caminhões são estabelecidas pelo Decreto Municipal nº 56.920/2016. No Rio de Janeiro, o Decreto Municipal nº 45.433/2018 estabelece as dimensões que os caminhões de pequeno porte devem possuir para circularem em áreas urbanas.

Ainda, a cidade de Belo Horizonte, por meio da Portaria 138/2009 e 077/2014 estabelece as vias ou trecho de vias em que são proibidas a circulação de veículos pesados, além dos horários em que eles podem circular. Este regulamento é importante devido a esses veículos, além do porte, serem mais lentos, podendo interferir na mobilidade dos demais veículos e causar retenções devido as atividades de carga e descarga (Prefeitura de Belo Horizonte, 2019).

As restrições em áreas urbanas justificam o aumento de caminhões leves e semileves na frota rodoviária, sendo os caminhões semipesados e pesados utilizados para atender o aumento da demanda de transferência de produtos, em grandes quantidades, já que estes sofrem restrições para atender áreas urbanas.

Sendo assim, o crescimento da frota de veículos pesados pode ser explicado devido ao aumento da demanda do modo rodoviário para o transporte de carga em grandes quantidades e por longas distâncias, ainda que não seja o modo mais eficiente (Almeida *et al.*, 2017). No período entre 2007 e 2013, houve um aumento de 16,9% no licenciamento de veículos rodoviários de carga, que representa um aumento da demanda de serviços de transporte rodoviário e uma maior pressão sobre as rodovias (CNT, 2014).

A inserção do biodiesel ocorreu a partir de 2005, como discutido no subcapítulo 4.2.3. A partir de 2008, houve um crescimento de 2,5% de biodiesel na mistura até o ano de 2012, e de 5% até 2015 (IBTS, 2019). Esse aumento gradual implicou numa redução de cerca de 1% ao ano na IC. A partir de 2015 até 2018, o acréscimo de biodiesel teve um aumento mais acentuado, cerca de 2% ao ano, até atingir a atual mistura B10. Esse aumento considerável implicou numa redução mais acentuada da IC entre 2016 e 2018, cerca de 8% ao ano (Figura 13).

Segundo EPE, (2019), o crescimento do biodiesel foi de 25,7% (0,7 milhões de tep), em 2018, compensando assim a redução do consumo de diesel fóssil de -1,4% (-0,5 milhões de tep).

Enquanto a IC começa a reduzir após 2005, a tendência é de aumento em um ritmo mais lento

para a IE, dado a diferença na densidade energética entre o biodiesel e o diesel mineral. Ainda que tenha havido a entrada de caminhões (semileves, leves, médios, semipesados e pesados) com melhor rendimento na frota rodoviária de transporte de carga, de cerca de 1% até 2015 e de 0,7% ao ano entre 2015 e 2018 (IBTS, 2019), a IE do transporte de carga apresentou aumento, crescendo, em média, 0,3% ao ano até 2015. No entanto, esse cenário muda entre os anos de 2015 e 2018, em que a IE decresce de forma acentuada, em média 1,5% ao ano (Figura 14).

A IC do transporte rodoviário de passageiros apresenta diversas variações ao longo do período em análise (Figura 15). Os principais responsáveis por essas variações é a utilização de diversos biocombustíveis.

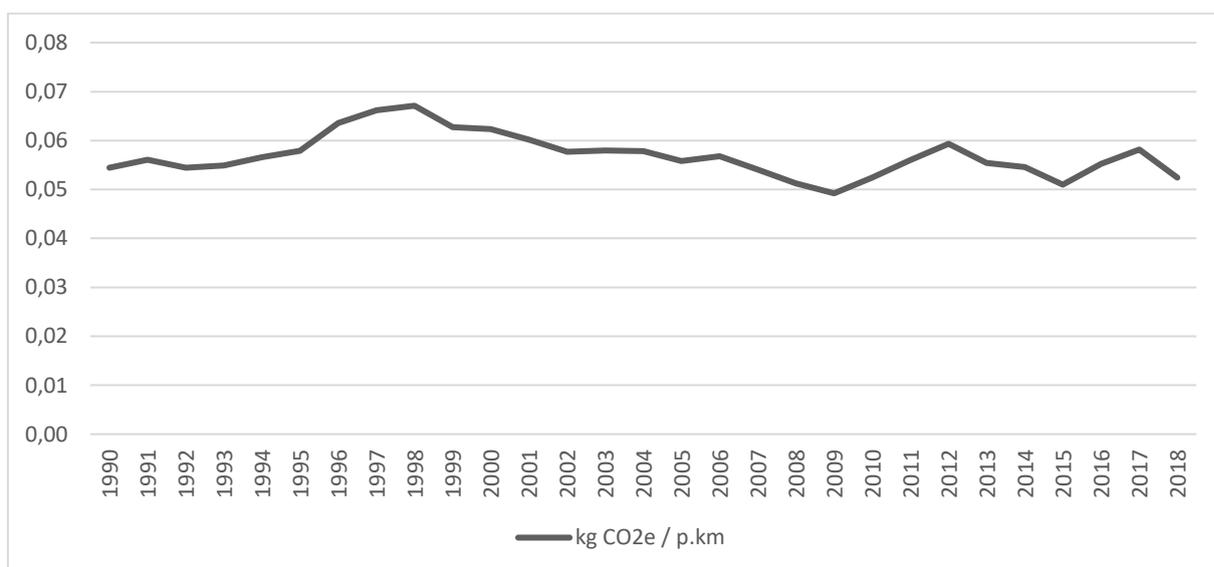


Figura 15: IC do transporte de passageiros do modo rodoviário

O etanol foi inserido na matriz energética brasileira em 1975, com o Programa Nacional do Álcool – Proálcool, que foi implantado devido à crise do petróleo, na década de 70, que impactou na balança comercial brasileira, levando o governo a investir em fontes alternativas, procurando viabilizar a substituição da gasolina pelo etanol produzido a partir da cana-de-açúcar. Esses incentivos foram direcionado a produção do etanol etílico e hidratado, financiamento no desenvolvimento de motores, e formação de uma extensa rede de distribuição desses combustíveis (D’Agosto, 2019).

O etanol anidro, desenvolvido na primeira fase do Proálcool, foi introduzido no mercado como um aditivo à gasolina, com uma proporção inicial de mistura de 10% de álcool anidro e, a partir de 1980, esse percentual aumentou para 22% (D'Agosto, 2019) e, hoje, a mistura é de 27% (La Rovere *et al.*, 2017). O etanol hidratado, desenvolvido na segunda fase do Proálcool, foi destinado, em 1980, a substituir integralmente a gasolina, em automóveis com motores de combustão interna dedicados a esse biocombustível.

A partir de 2003, iniciou-se a comercialização de veículos *flexible fuel*, isto é, capazes de utilizar gasolina e etanol juntos e em quaisquer proporções, já que com a queda do preço do barril de petróleo, não era mais vantajoso a utilização apenas de etanol hidratado (D'Agosto, 2019).

A partir de 1990 até 1997, houve um aumento de 22% da IC e de 12% da IE (Figura 16). De acordo (ANFAVEA, 2019), na década de 1990, houve aumento significativo da venda de automóveis, comerciais leves e motocicletas. Isso se deveu ao lançamento do programa do carro popular em 1993, que previa alíquotas tributárias reduzidas e ajudou a promover a revitalização do setor automotivo e, conseqüentemente, levou ao aumento na produção (BNDES, 2008).

Além disso, o Plano real, que foi implementado a partir de 1994, resultou numa maior estabilidade econômica, viabilizada pela abertura da economia (Goldenstein, 1998; Machado e Moreira, 2001), que gerou reflexos nos próximos anos, tal como a redução da desigualdade de renda e, conseqüentemente, um maior poder de compra (Brasil, [s.d.]). Em 1995, o governo anunciou uma política industrial direcionada ao segmento automobilístico, viabilizando investimentos para o setor, permitindo que diversas montadoras se instalassem no Brasil, e a expectativa para o período era de manutenção do crescimento exponencial da demanda (BNDES, 2008).

No entanto, a partir de 1998, houve redução de 14% da IC e de 17% da IE. No segundo semestre de 1997, a crise asiática interrompeu o crescimento da indústria automotiva, devido à elevação da taxa de juros, afetando as vendas que dependem de crédito e financiamento, e, em 1998, a crise da Rússia reforçou a desestrutura desse setor (BNDES, 2008). Esse cenário explica a queda acentuada da intensidade de carbono (-29%), a partir de 1998 até 2008.

A partir de 2008, as crescentes vendas de automóveis ocorreram devido a decisões políticas, que objetivaram o fortalecimento da economia brasileira por meio do investimento no setor automobilístico devido à crise econômica internacional. Sendo assim, o governo brasileiro

investiu 8 bilhões de reais para aquecer esse setor e beneficiar o sistema de financiamento na aquisição de veículos, por meio da redução do imposto sobre produtos industrializados (IPI), o que favoreceu a aquisição do carro zero e gerou queda nos valores dos carros usados (Silva *et al.*, 2012).

Para este mesmo período, também foram investidos 140,3 bilhões de reais no Crédito Direto ao Consumidor (CDB), sendo 63% do total para vendas de automóveis e comerciais leves. Ademais, o Brasil promoveu um plano de parcelamento amplo no que se refere aos meses de pagamento a prazo e, para facilitar as aquisições de veículos novos, as montadoras e financeiras passaram a oferecer planos de venda com pagamentos em até 80 meses (Silva *et al.*, 2012).

A quantidade total de veículos por 1.000 habitantes (taxa de motorização), que inclui motocicletas, automóveis, comerciais leves e ônibus, aumentou de 104 veículos por 1.000 habitantes, em 1990, para 306 veículos por 1.000 habitantes em 2018 (IBTS, 2019). Isto ocorreu devido a migração dos passageiros do transporte público para o uso de automóveis ao longo desse período. O aumento da frota de automóveis particulares, devido a sua baixa taxa de ocupação por veículo, reduz a eficiência do sistema, implicando no aumento do consumo de combustível, que não é alcançado pela atividade, e, conseqüentemente, aumenta a IE.

Outro fator que tem influência nas variações da IC e da IE é a obrigatoriedade da mistura do biodiesel no diesel a partir de 2008, como mencionado no transporte rodoviário de carga. Esse combustível também é utilizado em ônibus urbanos e rodoviário para o transporte de passageiros.

Além disso, a partir de 2015, houve a redução de passageiros que realizavam viagens por ônibus urbanos devido o surgimento de aplicativos de serviços de transporte, seja para uso individual ou compartilhado (NTU, 2018) . A utilização desses aplicativos tem sido mais intensiva em centros urbanos adensados, influenciando o padrão de viagens (STANDING *et al.*, 2019).

Na análise realizada, buscou-se identificar as causas das variações mais acentuadas ao longo do período de estudo. No entanto, não foram analisadas as variações menos significativas. De modo geral, a partir de 2003, com a entrada dos veículos *flexible fuel* no mercado, essas variações menos expressivas se devem a escolha entre gasolina e etanol hidratado que flutuam com o preço de ambos, dado o menor poder calorífico deste biocombustível.

Em 2018, o setor de transporte teve seu consumo reduzido em 0,69 milhões de tep, devido,

sobretudo, à redução do consumo de gasolina A de 13,1% (-3,3 milhões de tep) e, consequentemente, do etanol anidro no mercado de veículos leves (EPE, 2019). O álcool hidratado por sua vez, cresceu 38,6% (2,9 milhões de tep), não compensando, portanto, o recuo do consumo da gasolina C (EPE, 2019). Esse cenário apresentado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) para o ano de 2018 aponta para a redução da IC observada para esse ano

Figura 15.

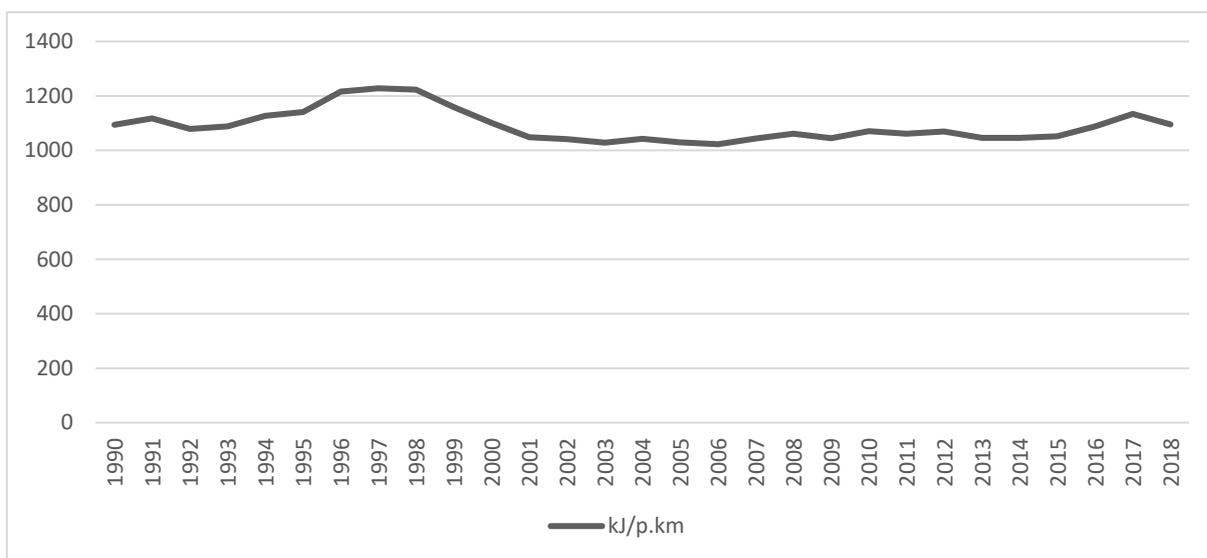


Figura 16: IE do transporte de passageiros do modo rodoviário

4.2 Outros modos

4.2.1 Aéreo

O modo aéreo utiliza como principais combustíveis o querosene de aviação, para aeronaves de transporte de passageiros e carga, e a gasolina de aviação, utilizada predominantemente em aviões de pequeno porte, empregados na aviação agrícola, aviação comercial de pequeno porte, aviação particular, treinamento de pilotos e em aeronaves experimentais e esportivas (Petrobras, 2014).

4.2.1.1 Coleta de dados e Cálculo das emissões

O cálculo para a emissão de CO₂ foi realizado a partir dos dados de consumo de energia, obtidos da EPE e do Fator de Emissão Implícito - FEI (*Tier 2*), calculado a partir das emissões de CO₂, CH₄ e N₂O e do consumo de energia divulgados pela ANAC anualmente, obtidos em IBTS (2019).

Desta forma, a partir do cálculo das emissões de CO₂ para modo aéreo com base na abordagem *Tier 2*, utilizou-se o GWP, apresentado no Apêndice 1, para a estimativa do CO_{2e}, em que se considera as emissões de gases causadores do efeito estufa não-CO₂.

4.2.1.2 Validação e cálculo da IC

A partir do cálculo das emissões equivalentes (CO_{2e}), foi realizada a validação por meio da comparação das emissões calculadas com base na abordagem *Tier 2*, e aquela utilizando os fatores genéricos da abordagem *Tier 1* (IPCC, 2006), como apresentado na Figura 17.

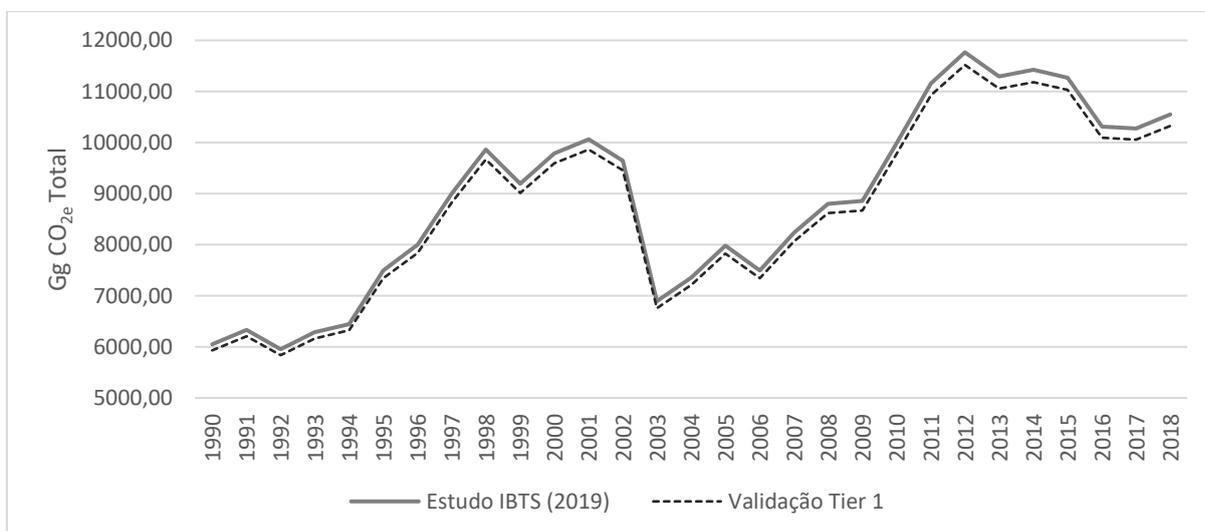


Figura 17: Gráfico comparativo de emissão de CO_{2e} do modo aéreo

Após validados os dados de emissão, utiliza-se aquele mais específico, em que se considera a realidade brasileira, isto é, com base na abordagem *Tier 2*. O momento de transporte, em p.km e t.km, utilizado neste estudo foram obtidos em IBTS (2019), que obteve esses dados a partir

de relatórios da ANAC, EPE e McKinsey & Company (2010). Sendo assim, é possível calcular a IC para o transporte aéreo de carga e passageiros, conforme apresentada análise no subcapítulo 4.2.1.3.

4.2.1.3 Análise Qualitativa e Quantitativa

A partir dos dados obtidos, foi possível calcular a IC do modo aéreo para o transporte de carga. No entanto, este estudo teve como limitação a identificação dos fatores históricos que impactaram na IC e IE do transporte aéreo de carga. Essa limitação se deve a baixa representatividade do transporte de carga no Brasil, de em média apenas 0,1% ao longo do período analisado. Portanto, não serão apresentadas a IC e IE para o transporte aéreo de carga, sendo realizada apenas algumas considerações referentes a esse modo.

De acordo com ANAC (2013), existem duas formas de serem transportadas as cargas em aeronaves, são elas: (1) transporte misto, em que a operação consiste no transporte de passageiros e carga, que pode ser levada no *deck* principal ou no porão da aeronave; e (2) transporte dedicado (cargueiros), em que o transporte é exclusivo para carga.

Pode-se apontar que a IC calculada para o transporte aéreo de carga é maior que a de transporte de passageiros (Figura 18 e 19), isso se deve a menor atividade de transporte (t.km), que tende a transportar menos cargas em longas distâncias. A sua baixa participação na divisão modal para o transporte de carga se deve ao seu alto custo de transporte, podendo ser cerca de 4 a 5 vezes mais custoso que o do transporte rodoviário e de 12 a 16 vezes mais custoso que o transporte aquático, isto se deve por ser preferencialmente direcionado ao transporte de carga com alto valor agregado, ou para o transporte de passageiros (World Bank, 2009).

Desta forma, o transporte aéreo de carga é voltado para a necessidade de entrega de uma carga de alto valor em menor tempo, sendo mais utilizada para o transporte internacional, que não é objeto deste estudo. A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) não disponibiliza dados referentes a frota dedicada, podendo-se inferir que a maior parte dos voos nacionais para o transporte de carga ocorra por meio do transporte misto. Segundo Kaufmann *et al.* (2009), as aeronaves dedicadas consistem numa adaptação de aeronaves de passageiros que alcançaram a metade da vida útil, mantendo sua capacidade de voo, mas perdendo as condições internas de conforto necessárias ao transporte de passageiros.

Ainda que não seja realizada uma análise específica das variações da IC para o transporte aéreo de carga, vale apontar que a correlação entre as variações da IC e da IE que, para o transporte de carga, possuem as mesmas tendências, pois utilizam apenas o Querosene de Aviação como combustível, sem a utilização de biocombustíveis nem eletricidade como fonte de energia. As tendências são basicamente as mesmas para ambos indicadores, uma redução de 0,12% em média da IC de 1990 até 2000, com uma acentuada redução de 8% até 2005 e, voltando a uma redução mais suave de 2% ao ano até 2018.

Vale ressaltar que a ANAC, que tem por objetivo regular e fiscalizar as atividades da aviação civil e a infraestrutura aeronáutica e aeroportuária no Brasil, foi instituída em 2005 e teve o início de suas atividades em 2006. Portanto, as estatísticas do setor de transporte aéreo foram elaboradas a partir desse ano pela ANAC, havendo poucos dados consistentes que possam justificar principalmente as variações da IC do transporte aéreo de carga.

A IC do transporte aéreo de passageiros é apresentada na Figura 18. A IC e a IE apresentam as mesmas tendências, pois não há a utilização de biocombustíveis nem eletricidade como fonte de energia. Portanto, será apresentada apenas o gráfico referente a IC.

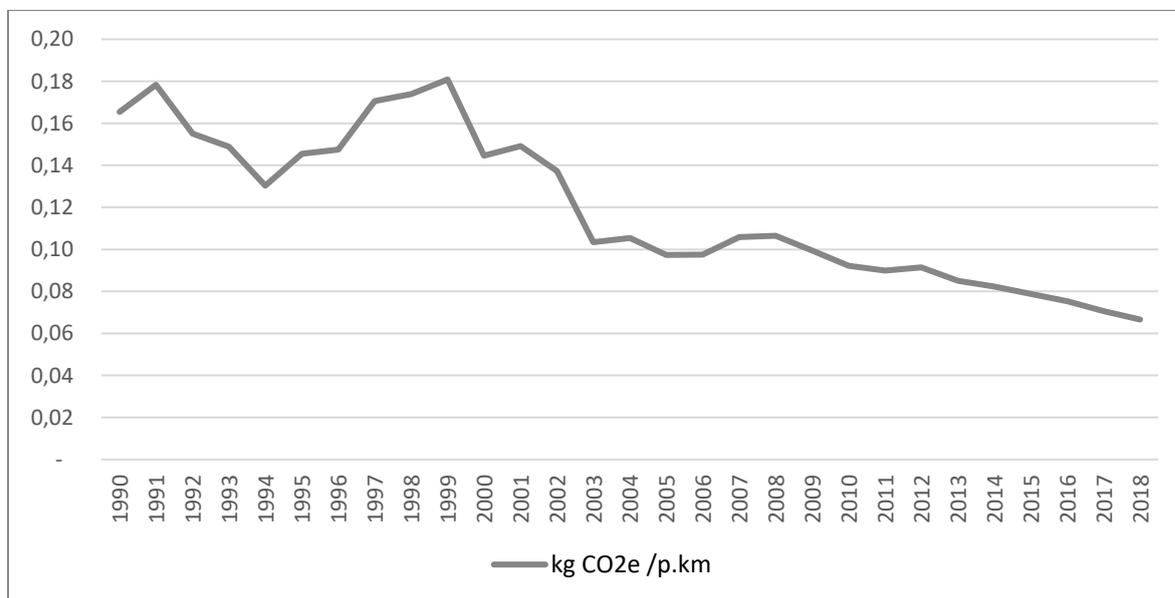


Figura 18: Intensidade de Carbono do transporte de passageiros do modo aéreo

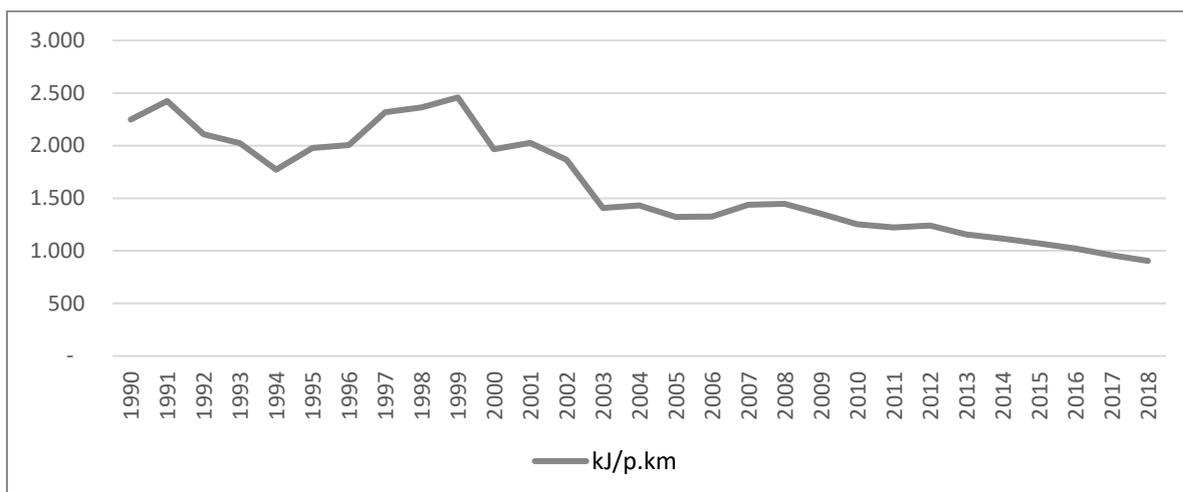


Figura 19: Intensidade Energética do transporte de passageiros do modo aéreo

O início da década de 90 foi marcado por instabilidade econômica, um reflexo econômico da década de 80, que do ponto de vista econômico foi conhecida na literatura como “década perdida”. Especificamente para o transporte aéreo, houve a partir de 1990 o início do processo de desregulamentação de um sistema fortemente regulado pelo governo e de baixa concorrência (ABEAR, [s.d.]; Ferreira, 2017). Além disso, a partir de 1991 houve a flexibilização do setor aéreo, permitindo a livre concorrência por meio da extinção do monopólio das empresas regionais e permitindo que as empresas pudessem variar o valor das passagens, fornecendo descontos nos preços dos bilhetes aéreos (Ferreira, 2017).

Entre 1990 e 1991, houve um crescimento pouco acentuado da IC, que se deve a um crescimento da demanda impulsionada por uma redução de 4% no preço das passagens, resultando no aumento da quantidade de voos e de passageiros transportados, impactando no aumento do consumo de energia (ABEAR, [s.d.]). Vale ressaltar que a baixa eficiência do sistema ocorreu devido a viagens com poucos passageiros e, segundo Ferreira (2017), houve na década de 80 investimento na compra de aeronaves que resultou no superdimensionamento da frota das empresas.

Entre 1991 e 1994, no entanto, devido ao baixo poder aquisitivo da população e ao aumento dos preços das passagens, com aumento de em média 5% aa entre 1990 e 1994, fez com que a demanda reduzisse em média 1% aa para esse período e, conseqüentemente, a quantidade de passageiros transportados, no entanto, aumentando-se o número de viagens realizadas por voos

nacionais (ABEAR, [s.d.]), impactando no consumo de energia, que reduziu em média 3% ao ano, e na atividade de transporte, que cresceu em média 7% ao ano.

O Plano real, implementado a partir de 1994, resultou numa maior estabilidade econômica, viabilizada pela abertura da economia (Goldenstein, 1998; Machado e Moreira, 2001), que gerou reflexos nos próximos anos, tal como a redução da desigualdade de renda e, conseqüentemente, um maior poder aquisitivo da população (Brasil, [s.d.]). Esse fato aliado a redução dos preços, até o ano de 1996, resultou no aumento da demanda e na quantidade de passageiros transportados. Apesar do crescimento da atividade de transporte, em média 8% ao ano, o crescimento do consumo de energia foi mais expressivo, em média 8,5%, resultando em um aumento pouco acentuado da IC, em média 0,2% ao ano.

No período entre 1996 e 1998, houve um crescimento da oferta de assentos de em média 10% ao ano, com o aumento do número de voos de 33% (GEIPOT, 2000), que buscavam atender o crescimento da demanda, em média 12% ao ano. No entanto, percebe-se que houve nesse período uma oferta maior do que a demanda (ANAC, 2013b), resultando numa menor taxa de aproveitamento das aeronaves. Esses fatores impactaram no aumento de em média 4,5% ao ano da atividade de transporte, e um aumento mais acentuado do consumo de energia, de em média 13% ao ano, impactando no aumento da IC de em média 8% ao ano.

No período seguinte, a partir do de 1999, pode-se observar que o comportamento da IC apresenta uma redução acentuada até o ano de 2003 de cerca de 48% para o transporte de passageiros e de 30% para o transporte aéreo de carga. De acordo com o Anuário do Transporte Aéreo, houve um aumento da oferta e na lotação média no ano de 1998 seguido de uma desvalorização da moeda no início de 1999, devido à crise Asiática, em 1997, e a mudanças na política cambial, em 1998, provocando o aumento da tarifa das passagens aéreas e conseqüente redução da demanda (ANAC, 1998, 1999). Esse fato explica conseqüente queda da IC para o transporte aéreo de passageiros nos anos após 1999 até 2003.

Portanto, na década de 1990, após longo período de regulação, as empresas aéreas brasileiras passaram a operar no livre mercado, dispondo de uma gradativa liberdade tarifária além da possibilidade de definição das rotas. No entanto, o livre mercado promoveu uma intensa concorrência, guerras tarifárias, desequilíbrio entre a oferta e a demanda, planejamentos equivocados, bem problemas financeiros provenientes dos custos de manutenção de uma frota extremamente diversificada e em alguns casos, obsoleta (Ferreira, 2017).

Vale ressaltar que, entre 2001 e 2002, foi implementado o Regime de liberdade tarifária, que permitiu que o valor médio das passagens aéreas pudesse ser reduzido pela metade, que passou a de fato ocorrer após o ano de 2003. No entanto, houve uma redução de 11% da oferta e de 6% da demanda entre 2002 e 2003 (ANAC, 2013b), que resultou numa redução de 9% na quantidade de passageiros pagos transportados, entretanto houve aumento da taxa de aproveitamento das aeronaves de cerca de 5% (ANAC, 2012), ocorrendo então em um aumento da Eficiência do sistema . Esses fatores impactaram numa redução de 28,3% no consumo de energia e de 4,8% da atividade de transporte, resultando numa redução acentuada da IC de 24% entre os anos de 2002 e 2003.

A partir de 2003, a oferta de assentos aumentou em média 13% ao ano e uma redução da tarifa até 2010, de modo a atender à crescente demanda, em média 15% ao ano (ANAC, 2013b), resultando no aumento de passageiros transportados e, conseqüentemente, aumento de 23% da taxa de aproveitamento (ou lotação) das aeronaves (ANAC, 2012), indicando o aumento da eficiência do sistema. Esses fatores impactaram no aumento da atividade de transporte de em média 8,5% ao ano e em um aumento menos acentuado do consumo de energia, em média 3,8% ao ano, resultando na redução da IC, menos acentuada do que no período anterior, de em média 4,4% ao ano.

Pode-se observar um aumento das emissões a partir de 2010 (Figura 17), que foi consequência do crescimento do transporte aéreo de passageiros, no Brasil, que implicou numa maior demanda de combustível no mercado interno, levando ao aumento significativo do consumo nos últimos anos (CNT, 2015), bem como da atividade de transporte deste modo. Além disso, iniciou-se as operações da Azul Linhas Aéreas para os Estados Unidos, em 2015 (ANAC, 2015). Vale ressaltar que para voos internacionais operados por companhias brasileiras, as etapas dentro do Brasil são consideradas como etapas domésticas, sendo, portanto, consideradas nesta análise.

Apesar do aumento das emissões, houve redução gradual da IC e IE do transporte aéreo, tanto para carga quanto para passageiros. Essa diminuição pode ser explicada pelas metas de redução de emissões de GEE, estabelecida pela Organização de Aviação Civil Internacional – OACI, em 2010, por meio do aumento anual de 2% da eficiência energética do setor até 2050, e tem como meta de crescimento neutro de carbono a partir de 2020, por meio de melhorias tecnológicas e operacionais, uso de combustíveis alternativos, conforme estabelecido pela

Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC (ANAC, 2015).

Esse marco explica uma queda da IC de 28% para o transporte aéreo de passageiros, entre aos anos de 2010 e 2018, decorrente do aumento de 46% da atividade de transporte (p.km), contra o aumento de apenas 6% do consumo de combustível, comprovando o aumento da EE.

Portanto, pode-se observar que, no período da análise, houve um aumento da demanda no transporte aéreo de passageiros e, devido a redução dos preços do bilhete aéreo desde o início dos anos 2000, resultou no aumento da atividade de transporte desse modo. Isso é um indício da captação dos usuários do transporte rodoviário de passageiros, considerando que há uma maior representatividade do transporte aéreo de passageiros na divisão modal, como será apresentado no subcapítulo 4.3.

4.2.2 *Aquático*

A análise do histórico da IC para o modo aquático será realizada apenas para Navegação Interior e Cabotagem, definidas pela Lei Federal nº10.893/04. A Navegação de Cabotagem é definida como aquela realizada entre portos brasileiros, utilizando exclusivamente a via marítima ou vias de navegação interior. A Navegação Interior, que também pode ser denominada fluvial e lacustre, é definida como a navegação realizada entre portos brasileiros usando exclusivamente as vias interiores.

Neste estudo, foi considerado que para vias interiores o principal combustível utilizado é o óleo diesel (sem mistura de biodiesel) e, para cabotagem, foi considerado o consumo do óleo combustível. Desta forma, para o transporte de passageiros considera-se apenas o uso de óleo diesel, enquanto para o transporte de carga, ambos combustíveis são utilizados.

Vale ressaltar que, não havendo mistura de biodiesel, as curvas de IC e IE possuem as mesmas tendências e, portanto, serão apresentadas apenas as curvas referentes à IC.

4.2.2.1 Coleta de dados e Cálculo das emissões

No Brasil, não é publicado Inventário de Emissões para o modo Aquático e, portanto, a validação dos dados foi realizada por meio da utilização dos dados de consumo de combustível do estudo do IBTS (2019) e dos obtidos no BEN (EPE, 2018). O cálculo das emissões totais de

CO₂, CH₄ e N₂O foi realizado para ambos com FE da abordagem *Tier 1*. A partir deste cálculo foi possível encontrar as emissões totais para ambos, em CO_{2e}.

4.2.2.2 Validação e Cálculo da IC

Vale ressaltar que no BEN os dados são fornecidos por consumo de combustível, isto é, consumo de óleo diesel e de óleo combustível de modo agregado. No estudo desenvolvido por IBTS (2019) os dados são discretizados também em transporte de passageiros e carga, fornecendo maior detalhe para análise.

Não houve divergência quando realizada a validação dos dados, ambos resultados de emissão de CO_{2e} foram iguais. No entanto, o estudo desenvolvido por IBTS (2019) será utilizado como referência para obtenção de dados para o cálculo de IC para o modo aquático proposto neste estudo, devido à sua discretização do transporte por atividade de passageiros e carga.

4.2.2.3 Análise Qualitativa e Quantitativa

O estudo elaborado por IBTS (2019) destaca que devido à dificuldade de obtenção de dados que permitam alocar o consumo de combustível de forma precisa para o transporte de carga e passageiro. Sendo assim, a abordagem *Top-down* tem seu uso justificado, neste caso, se levado em consideração também que o modo aquático tem baixa representatividade na matriz energética do subsetor de Transporte.

O GEIPOT é a principal fonte para a atividade de transporte até o ano 2000. No entanto, no ano de 2002 ele foi extinto, promovendo a partir deste ano, uma oscilação e divergência entre as novas fontes de dados de valores de atividade, que influenciam diretamente no cálculo da IC para este modo.

A escassez de dados para o modo aquático impossibilitou que pudessem ser identificados e correlacionados os fatores históricos políticos ou medidas de mitigação e seu impacto na IC do transporte aquático de carga e passageiros para todo o período da análise. Desta forma, foi apresentado neste subcapítulo apenas as variações e alguns fatores que impactaram em alguns períodos a IC, sendo apresentada, portanto, uma análise superficial.

A IC para o transporte de carga (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) apresentou uma queda acentuada de em média 5% ao ano a partir de 1995 até 2000. Isso se deve a um crescimento na atividade de em média 9% para cabotagem e de 4% para Navegação Interior entre 1995 e 2000, contra uma redução de em média 11,2% ao ano no consumo de óleo combustível e de em média 6% ao ano no óleo diesel, utilizado no transporte de carga.

Entre 2000 e 2018 essa redução da IC foi em média de 2% ao ano, decorrente do crescimento em média de 4% ao ano da atividade do transporte de cabotagem contra um crescimento de apenas 1,5% ao ano no consumo de combustível, ainda que a Navegação Interior tenha apresentado uma redução da atividade de em média 0,3% ano, contra uma redução de em média 0,5% ao ano.

A partir dos dados de atividade de transporte, obtidos em IBTS (2019), foi possível calcular a IC para o transporte aquático de passageiros. No entanto existe uma carência de dados referente ao transporte aquático de passageiros, bem como para o transporte de carga, limitando a análise realizada neste estudo.

A IC do transporte aquático de passageiros apresentou uma redução significativa ao longo da série histórica. Isto se deve sobretudo ao aumento da atividade de transporte (passageiro-quilômetro), que cresceu anualmente de aproximadamente de 2% em média até 2003, passando para um crescimento anual entre 10% e 13% até 2007 (IBTS, 2019) e que foi estabilizando a partir de 2012. No entanto, o consumo de combustível variou menos de 1% ao ano para esse período.

O Plano Plurianual – PPA, para o Programa de Manutenção de Hidrovias visa manter as características físicas e operacionais das vias navegáveis interiores. O estudo de IBTS (2019) aponta que essa variação na atividade de transporte pode ter relação com PPA de 2004/2007 que resultou em um aumento de 92,24% no orçamento se comparado ao PPA anterior.

4.2.3 Ferroviário

O modo ferroviário tem como principal fonte de energia o diesel e a eletricidade. A partir do ano de 2005, passou a ser utilizado uma mistura de biodiesel no diesel mineral. Vale ressaltar que, a eletricidade é utilizada, de modo geral, para o transporte de passageiros e, como a análise dos modos considera apenas o uso final, a sua emissão de GEE é nula, como discutido nos

subcapítulos 3.4 e 3.5. Além disso, para o transporte de carga, a partir de 2006, são considerados apenas a emissão de CO₂ do diesel, pois não é contabilizado as emissões de biodiesel, apenas as emissões de gases não-CO₂.

4.2.3.1 Coleta de dados e Cálculo das emissões

O Inventário Nacional de Emissões para o modo ferroviário (ANTT, 2012) foi utilizado como estudo de referência, que possibilitou o cálculo do Fator de Emissão Implícito (*Tier 2*) e posterior validação das emissões. O Inventário Nacional de Emissões para o modo ferroviário (ANTT, 2012) foi utilizado como estudo de referência, que possibilitou o cálculo do Fator de Emissão Implícito (*Tier 2*) e posterior validação das emissões.

No entanto, o Inventário de Emissões para o modo ferroviário foi publicado apenas no ano de 2011, reportando apenas as emissões do período compreendido entre os anos de 2002 e 2011. Além disso, o estudo não considerou a mistura de biodiesel a partir de 2006 e, sendo assim, as emissões calculadas são maiores do que as reportadas.

4.2.3.2 Validação e Cálculo da IC

A validação ocorreu com a comparação dos resultados de emissão calculados a partir de dados de consumo de energia do Balanço Nacional de Energia – BEN, e da multiplicação pelo FE *Tier 1* e pelo FEI (*Tier 2*) calculado.

Portanto, para o modo ferroviário, devido a inconsistências dos dados do Inventário Nacional Ferroviário, foi considerada as emissões calculadas pela abordagem *Tier 1*, com dados de consumo de energia retirados do BEN, e o momento de transporte obtido em IBTS (2019), possibilitando o cálculo da IC.

4.2.3.3 Análise Qualitativa e Quantitativa

A IC do transporte ferroviário de carga é apresentada na Figura 20.

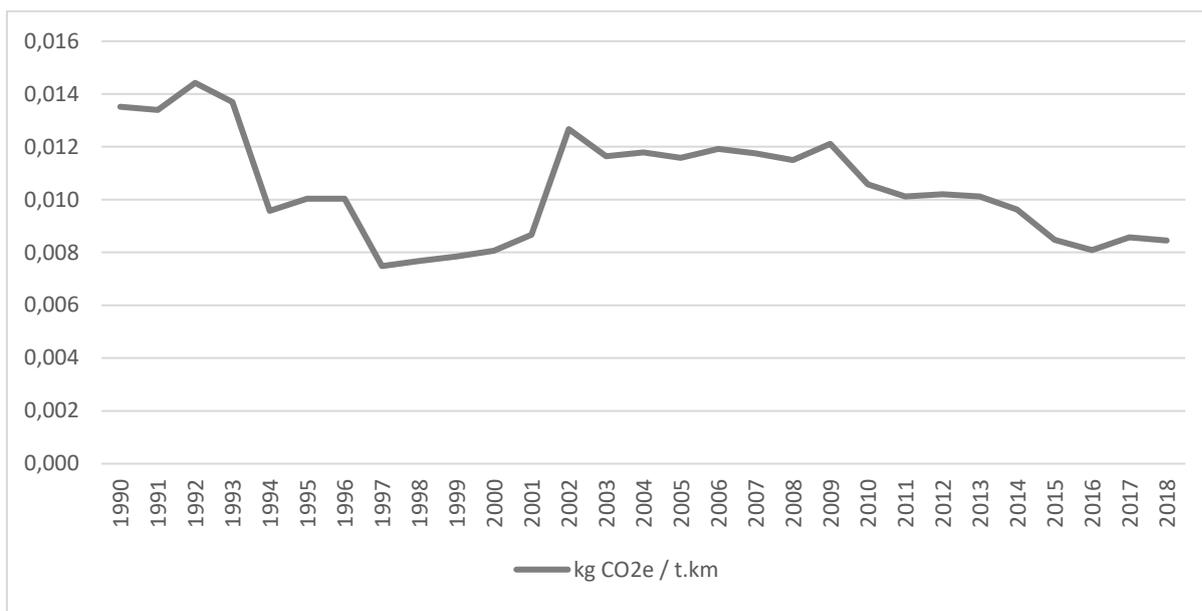


Figura 20: Intensidade de Carbono do transporte de carga do modo ferroviário

A variação da IE no período considerado no estudo (Figura 21) apresenta comportamento similar à variação da IC. De fato, a média de variação anual para o período entre 1990 e 2005 foi em média uma redução de 48% até 1997 e aumento de 0,242% para ambos até 2005.

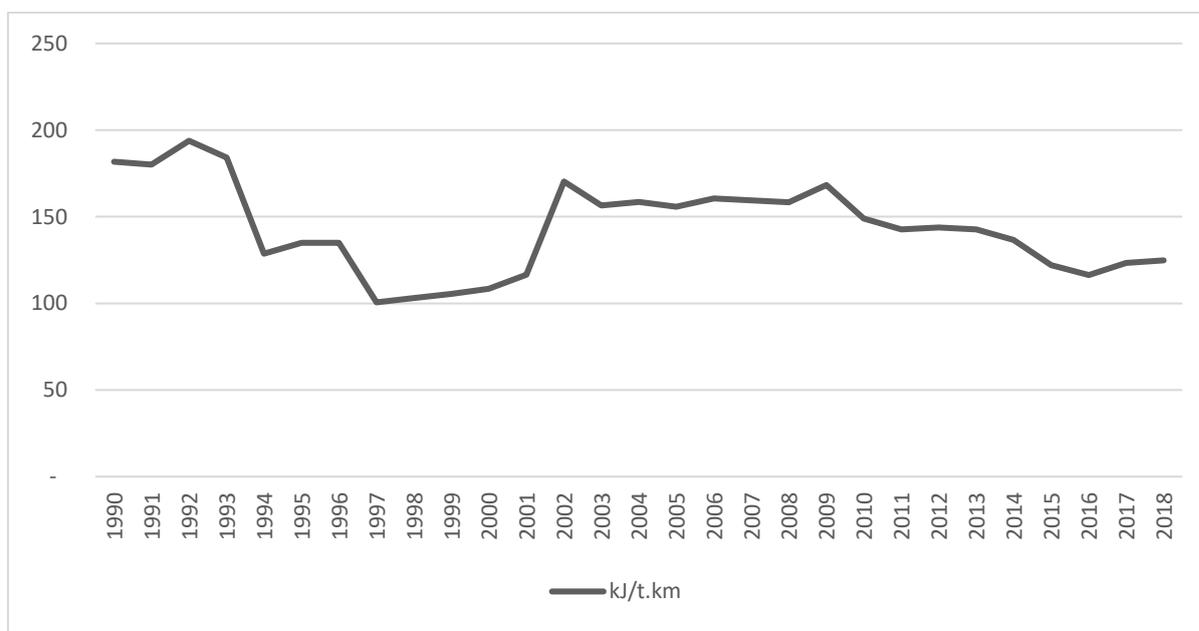


Figura 21: Intensidade Energética do transporte de carga do modo ferroviário

O biodiesel foi inserido na matriz energética brasileira com Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), regulamentado pela lei nº 11.097/2005. A partir de 2005, iniciou-se a mistura de biodiesel ao diesel mineral, mas foi a partir de 2008 que essa mistura se tornou obrigatória, em qualquer parte do território nacional, ao percentual mínimo de dois por cento (ANP, 2017a).

A lei nº 13.263/2016 ampliou, em 2017, o percentual obrigatório de biodiesel para 8%; para 9% em 2018; e para 10% em 2019. Entretanto, em 2017, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) decidiu antecipar para 2018 o percentual obrigatório de 10% de biodiesel na mistura – B10 (ANP, 2017b).

Sendo assim, até o ano de 2006, as duas curvas apresentam o mesmo comportamento e, a partir de 2006, o comportamento da IC e IE sofreu alterações, com redução média da IC em 2,25% ao ano e uma redução da média da IE de 1.54% ao ano, isto é, uma diferença da variação de 46% entre elas (Figura 22).

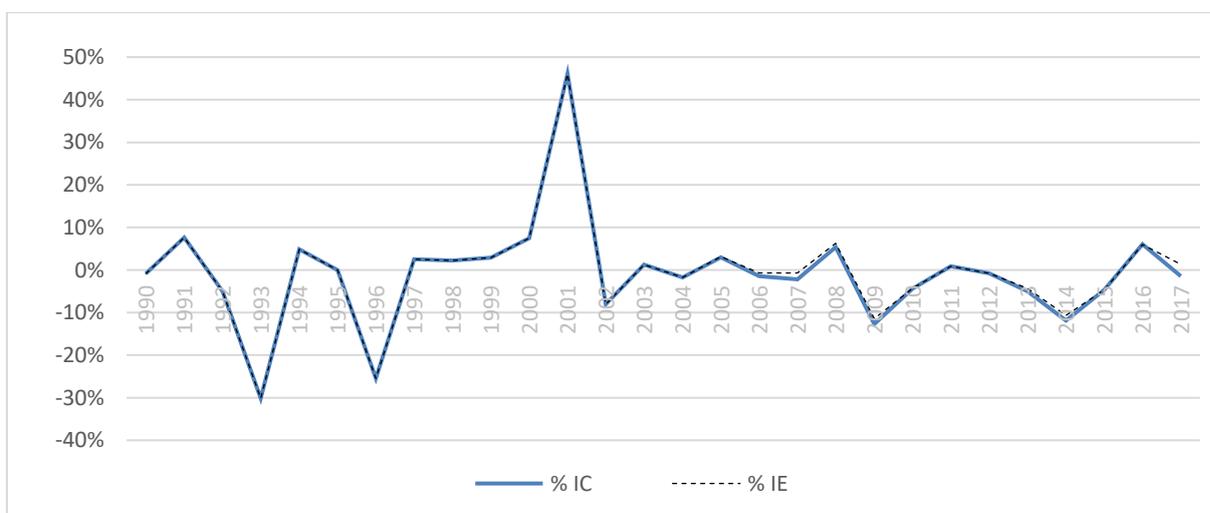


Figura 22: Variação ano a ano da IC e IE para o modo ferroviário

Em 1957, foi criada a Rede Ferroviária Federal S/A - RFFSA, que unificou 42 ferrovias existentes no país, e as estradas de ferro estatizadas no Estado de São Paulo foram incorporadas à estadual Ferrovias Paulista S/A - Fepasa (DNIT, 2015). Ambas as empresas tinham como objetivo eliminar trechos deficitários e focavam no transporte de cargas, em detrimento do transporte de passageiros.

A crise do petróleo na década de 1970 impactou o mercado brasileiro na década seguinte. De acordo com IPEA (2010), as sucessivas crises econômicas decorrentes tornaram a situação da RFFSA e da Fepasa insustentável, reduzindo os investimentos na malha ferroviária e acarretando o sucateamento de alguns trechos. O aumento das dívidas fez com que houvesse a privatização das ferrovias sob controle das estatais, que teve como principal marco a inclusão da RFFSA no Programa Nacional de Desestatização (PND). Dessa forma, em 1996, a RFFSA teve seus ativos leiloados. Em 1998, a malha da Fepasa foi incorporada à da RFFSA, com a extinção da estatal paulista, que foi concedida a administradores privados. A RFFSA foi extinta em 2007.

Vale destacar que, além das ferrovias da RFFSA e da Fepasa, duas outras importantes ferrovias, a Estrada de Ferro Vitória – Minas (EFVM), incorporada pela Vale na sua criação, em 1942, e a Estrada de Ferro Carajás (EFC), construída pela própria Vale na década de 1980, eram operadas pela própria Vale (antiga Cia. Vale do Rio Doce) (IPEA, 2010) e são utilizadas principalmente para o transporte de minério de ferro produzido pela própria empresa (ANTT, 2012)(ANTT, 2012).

Sendo assim, por serem essas ferrovias operadas pela Vale, não sofreram o processo de sucateamento ocorrido com as demais ferrovias do país (IPEA, 2010). Com a privatização da Vale na década de 1990, estas duas ferrovias foram concedidas pelo governo federal à própria Vale em 1997. Esse sucateamento das ferrovias nacionais até 1997, considerando um período para retomada da operação, com exceção das ferrovias operadas pela Vale explica a redução da IC e da IE neste período, já que no período as curvas apresentadas para esses indicadores possuem mesmo comportamento por não existir implantação de biocombustíveis.

De acordo com os dados disponibilizados Inventário Nacional de Emissões para o modo ferroviário (ANTT, 2012), ainda que limitado aos anos de 2002 a 2011, bem como para os dados de momento de transporte, levantados de ANTT (2016), foi possível calcular a IE por ferrovia para esse período. O resultado corrobora com a queda da IC e da IE no período referente ao início da década de 1990, já que a maior eficiência das ferrovias operadas pela Vale ter reduzido os valores de IC e IE, devido ao sucateamento das vias federais que estavam sendo privatizadas (Figura 23).

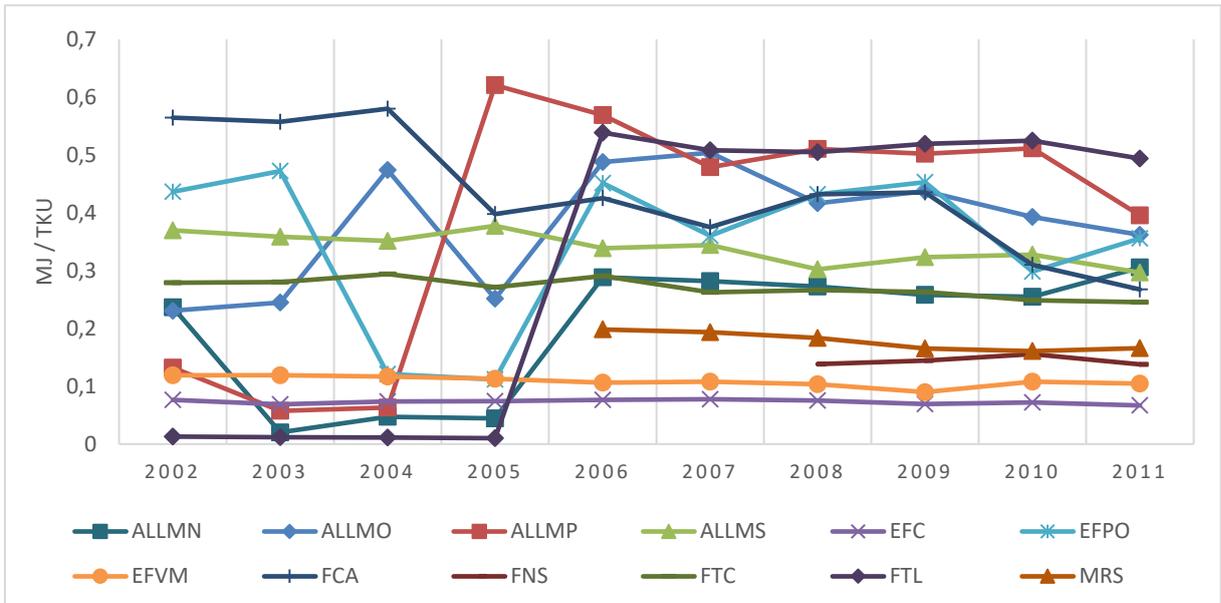


Figura 23: Intensidade Energética por ferrovia, no Brasil

Legenda: **ALLMN** - América Latina Logística Malha Norte S.A.; **ALLMO** - América Latina Logística Malha Oeste S.A.; **ALLMP** - América Latina Logística Malha Paulista S.A.; **ALLMS** - América Latina Logística Malha Sul S.A.; **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.

De modo a destacar a IE das ferrovias operadas pela Vale, a Figura 24 apresenta as IE da EFC e da EFVM e a média da IE de todas as ferrovias operadas durante o período de 2002 até 2011.

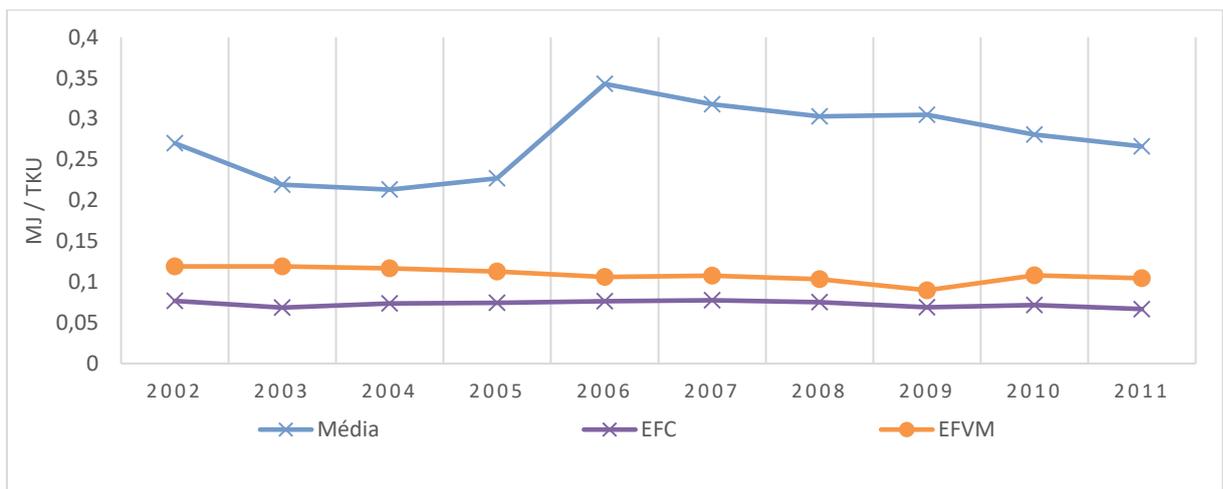


Figura 24: Comparativo da IE das ferrovias EFC e EFVM operadas pela Vale e da média das ferrovias em operação no Brasil

A MRS, por exemplo, passou a ser, a partir de 1996, uma companhia privada, quando o governo transferiu para a iniciativa privada a gestão do sistema ferroviário, e que teve aumento da sua atividade apenas a partir de 2006, sendo responsável pela movimentação de carga em média de 21% (ANTT, 2012). A participação da MRS só passou a ser importante tardiamente. As ferrovias operadas pela Vale, no entanto, são responsáveis por em média 60% da atividade nesse mesmo período (ANTT, 2012). Pode-se assumir que a Vale a partir da sua privatização, em 1990, passou a representar parte importante da atividade de transporte de carga, reforçando a sua participação na redução da IE e da IC.

Vale ressaltar que no período entre 2002 e 2011, apresentados nas Figuras 22 e 23, as principais ferrovias nacionais encontravam-se sob a gestão de grandes operadores privados, os quais realizam exclusivamente transporte de cargas, enquanto apenas parte residual da malha brasileira estava sob gestão estatal.

Do mesmo modo que o transporte aéreo está captando a demanda do transporte rodoviário de passageiros, o transporte ferroviário está captando ao longo dos últimos anos a demanda do transporte rodoviário de carga, principalmente por ter maior capacidade, sendo do ponto de vista de EE o mais interessante na transferência de carga, principalmente se considerada a necessidade da redução de emissões de GEE do setor de transporte.

4.3 Setor de Transporte

Nesta subseção busca-se analisar as tendências da IC total do setor de transportes isoladamente, para passageiro e para carga, sem considerar a necessidade do relato multisetorial dos resultados. Essa análise visa contribuir para a melhor compreensão do impacto da divisão modal na IC total.

4.3.1 Coleta de dados e Cálculo das emissões

O cálculo das emissões total foi realizado a partir da soma das emissões de cada modo de transporte, considerando também as emissões finais dos biocombustíveis, não considerada na análise dos modos. Essas emissões foram consideradas apenas para a análise da inserção de fontes renováveis no setor, sem finalidade de reporte, devido à questão discutida sobre o reporte de emissões por outros setores.

4.3.2 Validação e Cálculo da IC

A aplicação do método para a IC total do setor de transporte não necessita de validação pois os dados de emissão já foram validados por modo, conforme apresentado nos subcapítulos 4.2.1 a 4.1.

Vale ressaltar que, o transporte dutoviário de carga por não foi considerado na análise por modo, pois utiliza de eletricidade para a movimentação da carga e, desta forma, não emite GEE quando considerada a análise TTW. No entanto, para o transporte de carga, foi considerado a atividade de transporte do modo dutoviário para o cálculo da IC total, bem como às emissões calculadas. Para o transporte de passageiros, foi considerado a soma das emissões dos modos e do momento de transporte para o cálculo da IC total.

4.3.3 Análise Qualitativa e Quantitativa

As tendências apresentadas pelo transporte de carga (Figura 25) são próximas aquelas do modo rodoviário, em parte devido a divisão modal, ainda que apresente desequilíbrio entre os a representatividade dos modos, para o transporte de carga, o modo rodoviário representa em média mais de 50% da movimentação da carga durante todo o período analisado (Figura 26).

O segundo modo mais utilizado para o transporte de carga é o ferroviário, representando em média 24% da atividade (Figura 25). Pode-se identificar que nos anos em que há a redução da IC para o transporte rodoviário, há um aumento do transporte ferroviário e do modo aquático, pois são os modos que tendem a captar a demanda do transporte rodoviário.

A IC do transporte aéreo de carga é consideravelmente mais elevada que a dos demais e, portanto, não foi representado na Figura 29 devido a escala.

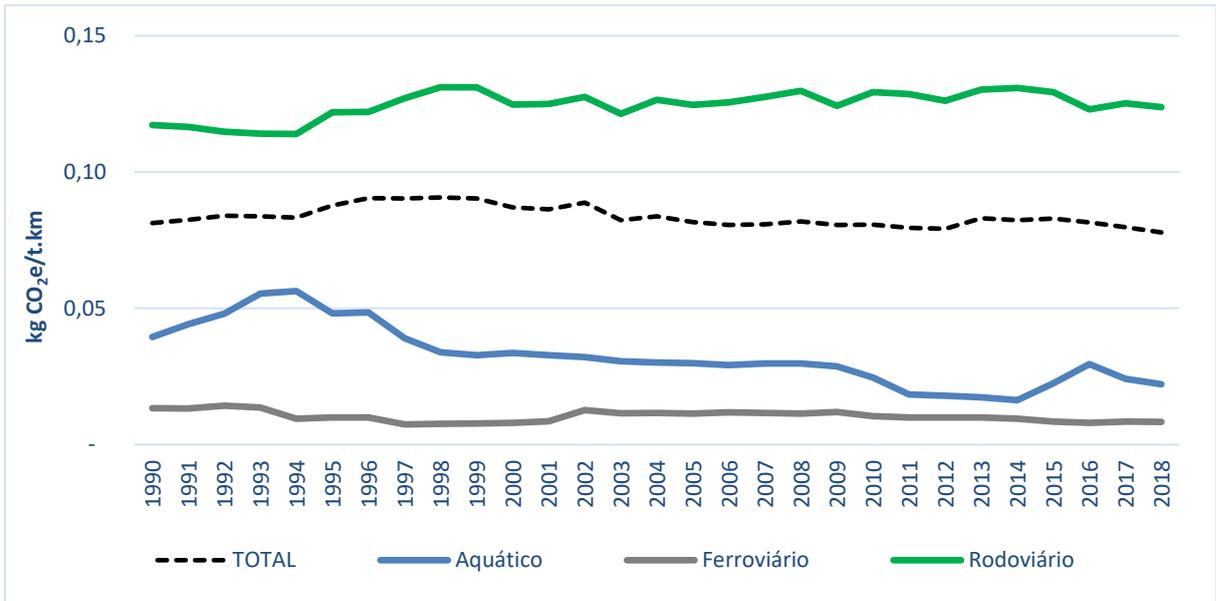


Figura 25: IC dos modos e IC total do transporte de carga no Brasil

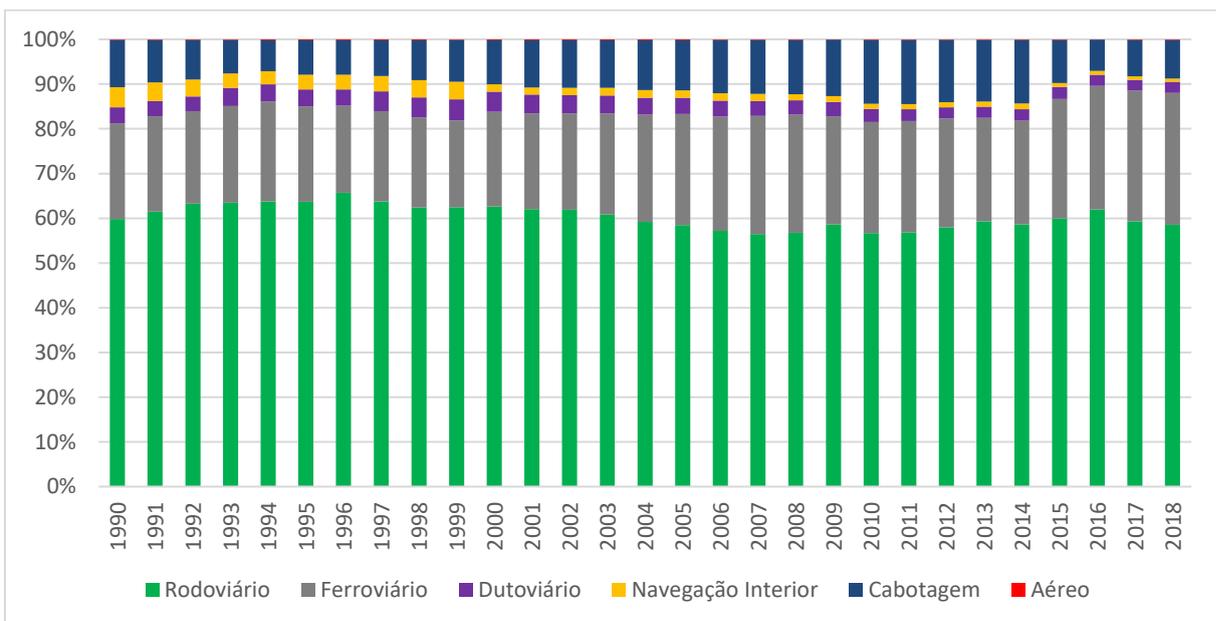


Figura 26: Divisão modal do transporte de carga

Os principais marcos históricos e medidas de mitigação que impactaram na IC do transporte de carga por modo são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Tabela Resumo do transporte de carga

Modo	Ano	Marco Histórico	Medida Mitigação	IC
Aéreo	1990 - 2000	Baixa atividade de transporte - alto custo do transporte aéreo de carga Representa apenas 0,1% do transporte de carga no Brasil		Redução pouco acentuada média 0,12% aa
	2000 - 2005			Redução acentuada média 8% aa
	2005 - 2010			Redução pouco acentuada média 2% aa
	2010 - 2018	Meta de redução de emissões: Energética do setor, a partir de 2010 Crescimento neutro de carbono a partir de 2020	Aumento anual de 2% na Eficiência Melhorias Tecnológicas e operacionais	Redução média 3% aa
Aquático	1990 - 1995			Aumento média de 5% aa
	1995 - 2000			Redução acentuada média de 7% aa
	2000 - 2018	Extinção d GEIPOT em 2000 oscilações e divergência nos dados dos anos seguintes		Redução Pouco Acentuada média de 2% aa
Ferroviário	1990 - 1997	Crise do Petróleo final década de 70 e sucessivas crises econômicas nos anos seguintes: Sucateamento das ferrovias Estatais Manutenção da Eficiência das Rodovias privatizadas da VALE (EFVM e EFC) - 60% da atividade	Aumento da Eficiência Energética e redução de IE das ferrovias operadas pela VALE	Redução acentuada média de 7% aa
	1997 - 2005	Recuperação das crises - resultado das privatizações	Aumento gradual da atividade (4% aa) e do consumo de combustível (10% aa)	Aumento acentuado média de 11% aa
	2005 - 2008	Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB)	Mistura de Biodiesel ao diesel mineral	Redução pouco acentuada média 0,61% aa
	2008 - 2016	A mistura do Biodiesel se torna obrigatória para todo Brasil, a partir de 2008 Aumento da IE (média 1% aa)	Percentual mínimo de 2%, crescimento gradual da mistura	Redução média 4% aa
	2016 - 2018		Aumento da mistura de Biodiesel de 8% para 9%, em 2017 Mistura de 10% de Biodiesel, em 2018	Redução pouco acentuada média 0,03% aa

Modo	Ano	Marco Histórico	Medida Mitigação	IC
Rodoviário	1990 - 2000	Aumento de veículos leves na frota e caminhões semileves e leves a diesel	Restrições de caminhões no Transporte Urbano de Carga (TUC): proibições de estacionamentos, a restrição de acessibilidade e de limitações às operações de carga e descarga no centro das cidades brasileiras	Aumento pouco acentuado média 1% aa
	2000 - 2015	Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) - a partir de 2005 Aumento da demanda do modo rodoviário para o transporte de carga em grandes quantidades e por longas distâncias entre 2007 e 2015	Percentual mínimo de 2%, crescimento gradual da mistura	Redução pouco acentuada média 0,5% aa
	2016 - 2018	Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB)	Aumento da mistura de Biodiesel de 8% para 9%, em 2017 Mistura de 10% de Biodiesel, em 2018	Redução acentuada média 7% aa
Dutoviário	1990 - 2018	Uso de eletricidade: emissão zero no uso final		Não apresentada IC no uso final

Em relação ao transporte de passageiros, na análise por modo, o transporte ferroviário não foi considerado, já que no uso final, não há emissões devido ao uso da eletricidade, sendo apresentado como zero na Figura 27. Na análise realizada neste subcapítulo, considera-se todos os modos para a estimativa da IC para o transporte de passageiros e, portanto, foi considerado no seu cálculo o momento de transporte do modo ferroviário de passageiros.

As tendências do setor do transporte de passageiros seguem àquelas do transporte rodoviário, como pode ser observado na Figura 27. Isso se deve ao transporte rodoviário representar cerca de 90% da divisão modal do transporte de passageiros no Brasil, como apresentado na Figura 28.

Portanto, essas tendências se devem sobretudo àquelas apresentadas na análise do transporte rodoviários de passageiros, na subseção 4.2.3.3.

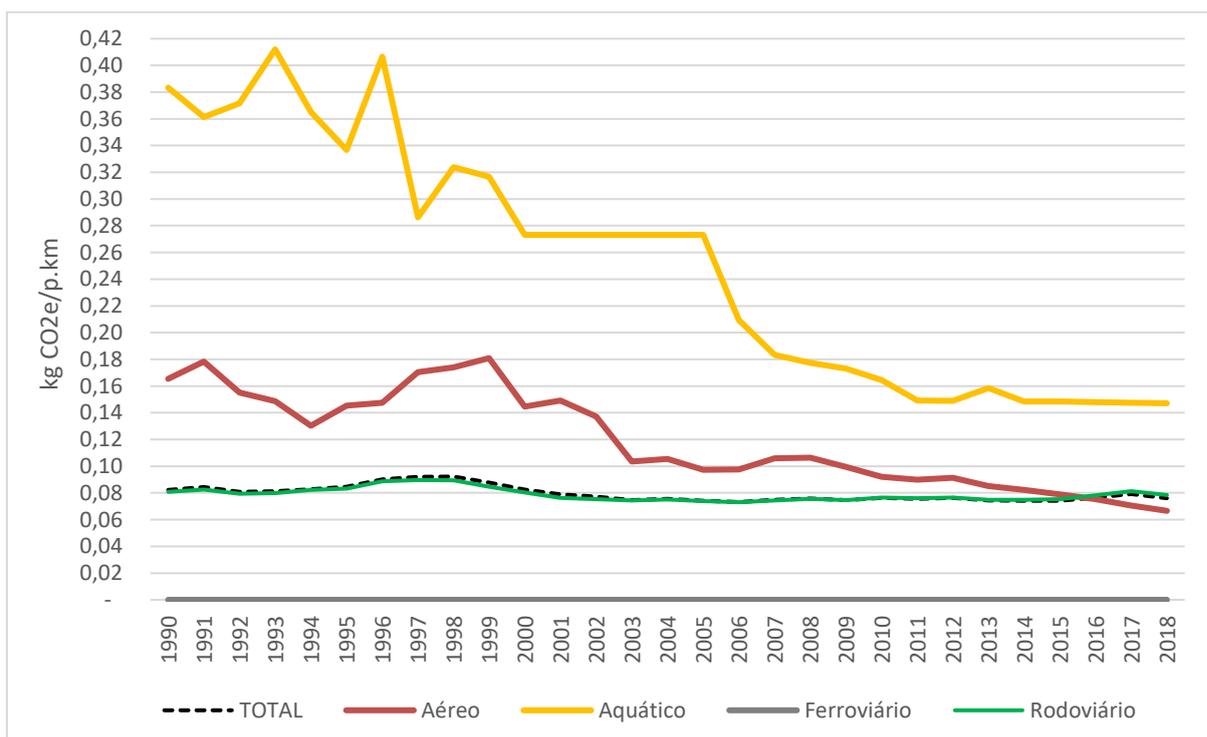


Figura 27: IC do transporte de passageiros no Brasil

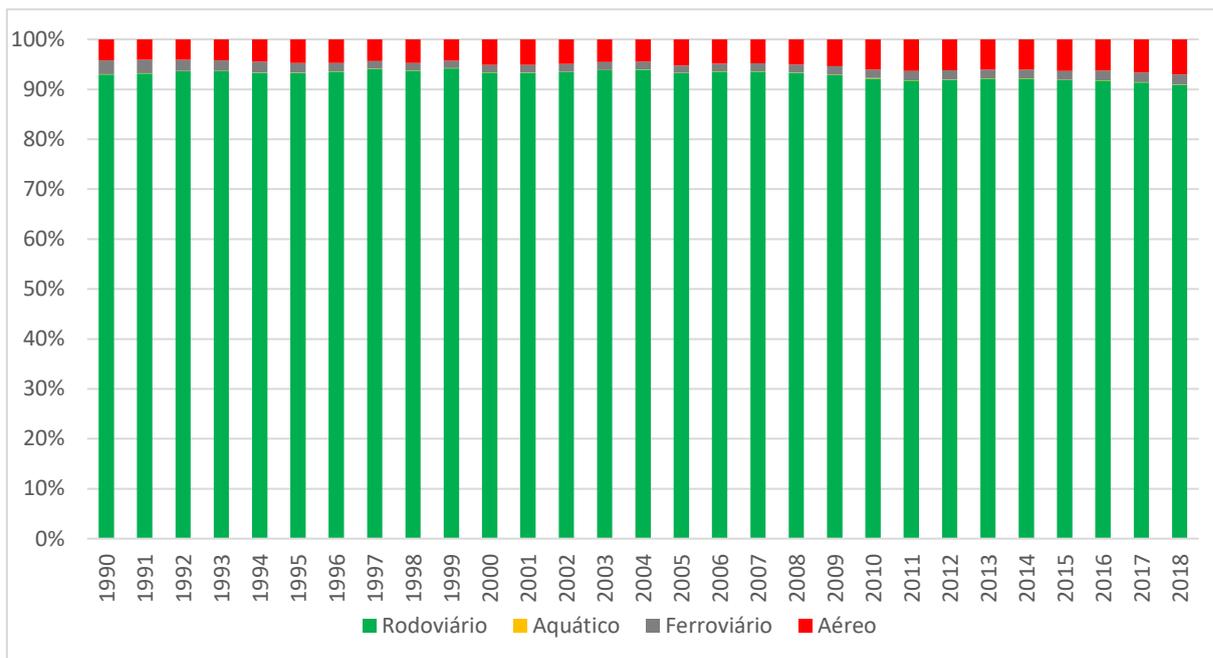


Figura 28: Divisão modal do transporte de passageiros

Os principais marcos históricos e medidas de mitigação que impactaram na IC do transporte de passageiros por modo são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Tabela Resumo do transporte de passageiros

Modo	Ano	Marco Histórico	Medida Mitigação	IC
Aéreo	1990 - 1991	Aumento da demanda Baixa Eficiência: baixa taxa de ocupação das aeronaves		Aumento acentuado Em média 8%
	1991 - 1994	Reflexos da crise na década de 80: - Baixo poder aquisitivo - Altos preços das passagens aéreas - Baixa demanda Início do processo de desregulamentação do sistema Flexibilização do setor aéreo: - Livre concorrência por meio da extinção do monopólio das empresas regionais - As empresas passam a poder variar o valor das passagens		Redução acentuada média 5,4% aa
	1994 - 1996	Plano Real - maior estabilidade econômica e aumento do poder de compra da população Redução dos preços das passagens aéreas		Aumento pouco acentuado média 0,2% aa
	1966 - 1998	Aumento da oferta de assentos e da quantidade de voos maior do que a demanda - Redução da Taxa de aproveitamento das aeronaves Crise Asiática (1997) e Mudanças na política cambial (1998): o aumento da tarifa das passagens aéreas e consequente redução da demanda nos anos seguintes		Aumento Acentuado média 8% aa
	1999 - 2003	Redução da demanda devido aumento da passagem 2002 e 2003: Adoção Regime de liberdade tarifária: redução do valor médio das passagens aéreas, com reflexos nos anos seguintes	Aumento da taxa de aproveitamento das aeronaves de cerca de 5%	Redução Acentuada Média 8% aa
	2003 - 2010	Aumento da oferta de assentos e da lotação média Aumento da demanda: Aumento das emissões		Redução média 4,4% aa

Modo	Ano	Marco Histórico	Medida Mitigação	IC
Aquático	1990 - 1995			Aumento acentuado média 8% aa
	1995 - 2000			Redução média 3% aa
	2000 - 2005	Extinção d GEIPOT em 2002 Oscilações e divergência nos dados nos anos seguintes		Sem variação
	2005 - 2008	Plano Plurianual – PPA: Programa de Manutenção de Hidrovias de 2004/2007, que resultou em um aumento de 92,24% no orçamento se comparado ao PPA anterior	Manutenção das características físicas e operacionais das vias navegáveis interiores -> Aumento da eficiência do sistema de hidrovias	Redução acentuada média 13% aa
	2008 - 2018			Redução média 2% aa
Ferrovário		Uso de eletricidade: emissão zero no uso final		Não apresentada IC
Rodoviário	1990 - 1998	(1) Programa Nacional do Álcool – Proálcool a partir da déc de 70 devido à crise do Petróleo (2) Aumento da venda de automóveis, comerciais leves e motos por meio do Programa Carro Popular de 1993 Plano Real - maior estabilidade econômica e aumento do poder de compra da população (1994) (3) Investimentos do Governo no setor automobilístico Crise Asiática, em 1997 – Crise da Rússia 1998	(1) Mistura de 22% de Etanol Anidro na gasolina A a partir de 1980 com crescimento gradual ao longo dos anos - Automóveis dedicados: Etanol hidratado (2) Incentivo a partir da redução de tributos (3) Abertura comercial: instalação de diversas montadoras no Brasil para manutenção do crescimento da demanda	Aumento média 1,5% aa
	1998 - 2003	(1) Programa Nacional do Álcool – Proálcool Reflexos da crise Asiática interrompe o crescimento da Indústria Automobilística, devido à elevação da taxa de juros, afetando as vendas Crise da EUA corroborou com a desestruturação do setor automobilístico	(1) Mistura de Etanol Anidro na gasolina	Redução pouco acentuada média 0,7% aa

Modo	Ano	Marco Histórico	Medida Mitigação	IC
	2003 - 2008	(2) Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) a partir de 2005	(1) Mistura de 27% de Etanol Anidro (2) Percentual mínimo de 2%, crescimento gradual da mistura	Redução média 1,5% aa
	2008 - 2018	(1) Investimento no setor automobilístico devido à crise internacional, em 2008: Aumento da venda de automóveis (2) Investimento de 140,3 bilhões de reais no Crédito Direto ao Consumidor (CDB) (3) Plano de Parcelamento Amplo (4) Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB)	(1) Investimento do Governo de 8 bi no setor para beneficiar o sistema de financiamento na aquisição de veículos - Redução do IPI (2) Promover a compra de automóveis e comerciais leves (3) Promover a compra de automóveis e comerciais leves com parcelamentos de até 80 meses (4) Aumento da mistura de Biodiesel de 8% para 9%, em 2017 - Mistura de 10% de Biodiesel, em 2018	Redução média 0,1% aa

4.4 Setor de energia

Neste subcapítulo, é realizada a análise do histórico de geração de energia, por meio do cálculo da IC do ciclo de vida das energias utilizadas no transporte de carga e passageiros no Brasil.

4.4.1 *Histórico Geração de Energia*

Ao considerar o ciclo de vida cálculo das emissões de GEE, deve-se levar em conta também a emissão proveniente da extração da matéria prima e seu transporte até o processo de refinaria, bem como a sua distribuição para os postos de abastecimento.

Desta forma, quanto maior for as fontes de energia renováveis e limpas, menores serão as emissões e, conseqüentemente, a IC para qualquer setor. No setor de transportes, a tendência é a eletrificação da frota, principalmente, do transporte rodoviário, com crescimento acentuado desde 2012, à medida que há penetração dos veículos elétricos no mercado dos países da OCDE, em particular na Europa (IEA, 2018b). Um exemplo deste crescimento é o uso de ônibus elétricos na China, que atingiu, em 2017, cerca de 370 mil unidades (IEA, 2018c).

No Brasil a eletrificação dos veículos rodoviários para o transporte de passageiros é interessante devido a participação expressiva de fontes renováveis e limpas na matriz energética. Na geração de energia elétrica, deve-se considerar sobretudo a matriz energética do país em estudo. No Brasil, segundo EPE (2019), em 2018, a participação de energias renováveis na matriz elétrica foi de 83,3%, sendo a grande parte desta referente a produção hidrelétrica (66,6%). Vale considerar que houve aumento na produção da energia eólica (14,4%) e solar (316,1%) entre 2017 e 2018 (EPE, 2019).

No entanto, seria necessário a promoção de medidas que incentivem a penetração desses veículos, sobretudo no que concerne a infraestrutura relacionada. Segundo ICCT (2017), a infraestrutura de carregamento, independentemente do tipo de carregador (lento ou rápido), é fundamental para o crescimento do mercado de veículos elétricos. A União Europeia possui uma diretiva que dispõe sobre a criação de uma infraestrutura para combustíveis alternativos (Diretiva Europeia 2014/94/EU), que também especifica diretrizes para veículos elétricos.

O Brasil não figura como um país relevante no segmento da eletromobilidade, no mundo, pois os Veículos Elétricos (VE) não figuram como uma prioridade para o estímulo da indústria

automobilística nacional. Por outro lado, o Brasil promoveu outras opções tecnológicas como, por exemplo, os biocombustíveis, na tentativa de enfrentar a dependência do transporte aos combustíveis fósseis.

Os principais programas em andamento no Brasil hoje são o Renovabio, Promob-e e o Rota 2030. A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), instituída pela Lei nº 13.576/2017, estabelece metas para a melhoria da IC da matriz brasileira de combustíveis, pois tem como objetivo expandir a produção de biocombustíveis no Brasil (MME, [s.d.]

O projeto de Promoção de sistemas de propulsão eficiente no contexto urbano para mobilidade inteligente no Brasil - PROMOB-e, que iniciou suas atividades em 2017, trabalha nas áreas de desenvolvimento de estratégias e políticas públicas para promoção de sistemas de propulsão eficiente, normalização e regulamentação para veículos elétricos no Brasil e modelos de negócios e projetos-piloto para sistemas de propulsão eficiente.

O Brasil, devido a predominância do transporte rodoviário, buscou, nos últimos anos, a melhoria da eficiência energética dos veículos automotores e da diminuição de emissões de GEE atrelada à atividade de transportes. O Programa Rota 2030 - Mobilidade e Logística foi estabelecido pela lei nº 13.755, de 10 de dezembro de 2018, e tem como objetivo apoiar o desenvolvimento tecnológico, a competitividade, a inovação, a segurança veicular, a proteção ao meio ambiente, a eficiência energética e a qualidade de automóveis, caminhões, ônibus, chassis com motor e autopeças.

4.4.2 Estimativa WTW para IC do setor de transporte

Neste subcapítulo, busca-se analisar de forma quantitativa o impacto da inserção de energias alternativas na IC do transporte de carga e passageiros no Brasil, comparando a IC considerando a análise do ciclo de vida (IC_{WTW}) e apenas o uso final (IC_{TTW}), como apresentado no subcapítulo 4.3.

4.4.2.1 Coleta de dados e Cálculo das emissões

O cálculo das emissões do transporte, de carga e passageiros, considerando a geração de energia foi possível a partir dos dados de consumo de energia, em litros (ou m^3) para os combustíveis

líquidos e gasosos (como o GNV), e em kWh para a eletricidade, obtidos em (EPE, 2019), e dos Fatores de Emissão (*Tier 1*), calculados a partir do uso de Fatores de escala para considerar o ciclo de vida da energia (WTW) utilizada para o transporte no Brasil (Apêndice 1).

4.4.2.2 Validação e Cálculo da IC

A etapa de validação dos resultados das emissões considerando o ciclo de vida não foi possível, pois não foi encontrado nenhum relatório nacional que tenha realizado esse tipo de abordagem.

A IC_{WTW} foi calculada por meio da abordagem *Top-down*, utilizando-se a emissão (WTW) calculada (*Tier 1*) e o momento de transporte de carga e passageiro, obtidos em IBTS (2019). A IC_{TTW} foi calculada a partir da soma das emissões de cada modo, considerando, para esta análise, a emissão final de CO₂ dos biocombustíveis. A partir disso, é possível comparar os impactos das tecnologias alternativas (biocombustíveis, eletricidade) nas duas análises.

4.4.2.3 Análise Qualitativa e Quantitativa

A IC do transporte de carga é apresentada na Figura 29. A diferença existente na IC do transporte é relativa à fase do WTT. Essa diferença da IC é em média 6% entre os anos 1990 até 2005, reduzindo para uma média de 5% até o ano de 2016, devido ao aumento gradual da mistura do biodiesel no diesel mineral, como discutido nos subcapítulos 4.2.3 e 4.2.3.3. Em 2017, com uma mistura de biodiesel alcançando 8%, a curva da IC_{WTW} passa a ter valores menores que a curva do uso final dos combustíveis (IC_{TTW}).

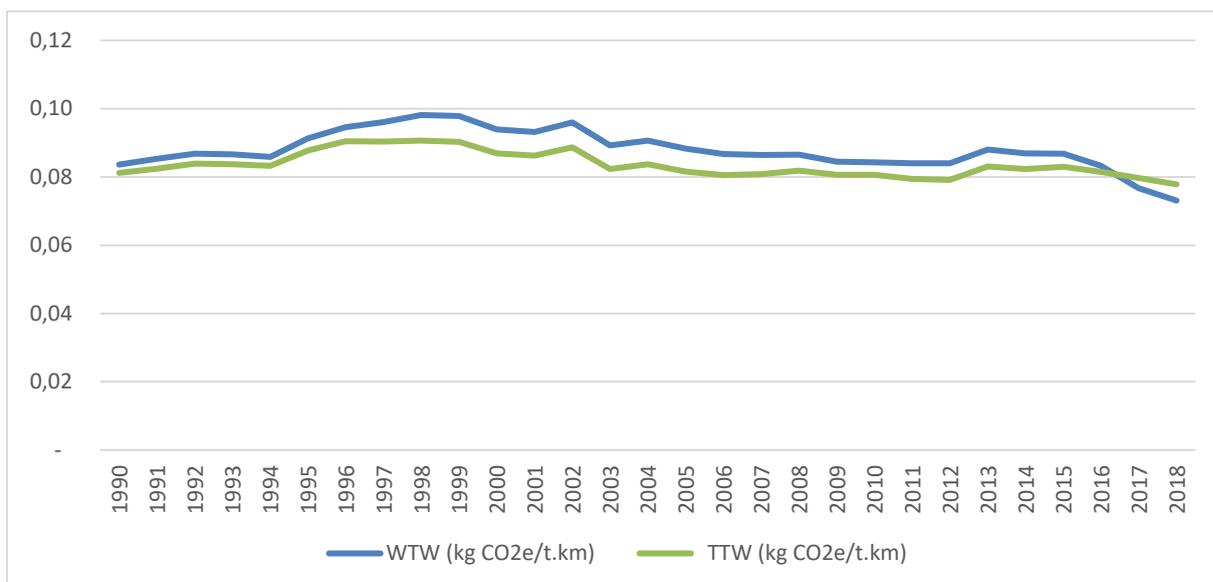


Figura 29: IC considerando o ciclo de vida e apenas o uso final para o transporte de carga no Brasil

Nota: IC_{WTW} está superestimada pois o FE utilizado leva em consideração a geração e o transporte da matéria prima, isto é, contabiliza duas vezes a emissão do transporte (transferência e distribuição dos combustíveis/biocombustíveis)

De modo geral, os biocombustíveis tiveram uma participação, em 2018, de 34% no transporte de passageiros, aumento de cerca de 2% em relação ao ano anterior. Além disso, especificamente, em 2018, houve aumento de 10% no uso da eletricidade no transporte ferroviário, bem como de 44% de biodiesel, contra 1% de aumento de uso do diesel, que impactou na redução entre a IC_{TTW} e IC_{WTW} . Além disso, para esse ano, o transporte rodoviário de carga reduziu o consumo de diesel em 3% e aumentou em 29% no consumo de biodiesel.

Essa análise permite avaliar como o incentivo do uso de energia mais limpas, nesse caso, dos biocombustíveis com emissão zero em seu ciclo de vida (WTW), auxiliam na redução do carbono no transporte.

Para o transporte de passageiros, a IC_{WTW} é menor que IC_{TTW} durante todo o período de análise (Figura 30), devido aos programas de utilização de etanol desde a década de 70, e de biodiesel a partir de 2005. Além disso, há a participação da eletricidade como fonte energia para o transporte ferroviário de passageiros, que representava cerca de 10% da IC total (WTW), em 2006, reduzindo para 7% em média a sua representatividade entre 2007 e 2018.

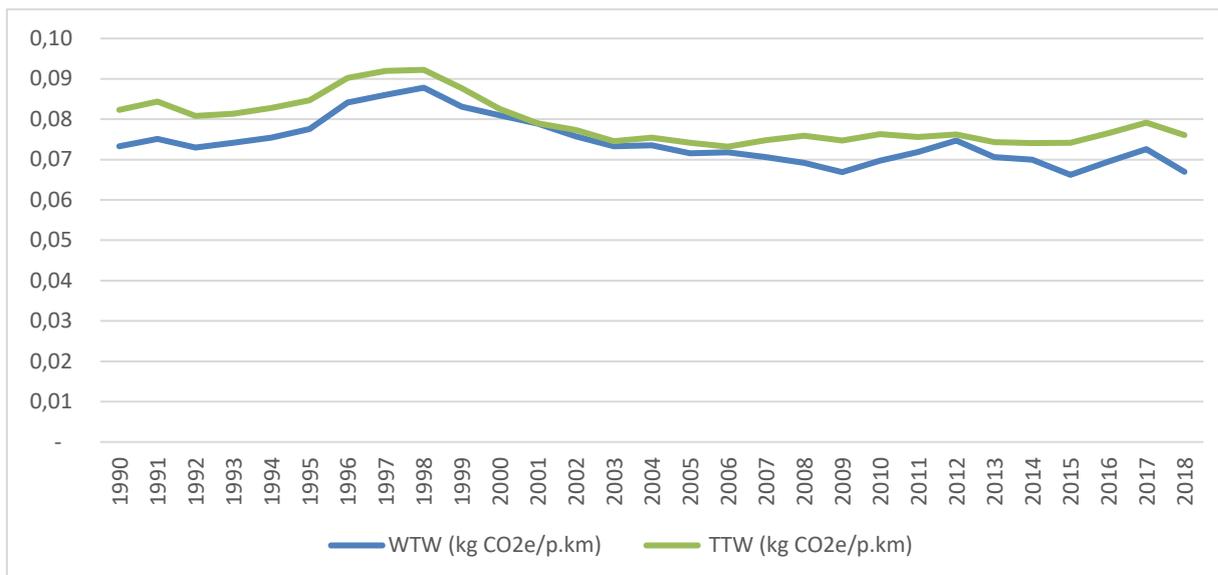


Figura 30: IC considerando o ciclo de vida e apenas o uso final para o transporte de passageiros no Brasil

No ano 2000, houve o menor consumo de biocombustíveis do histórico analisado, representando apenas 22% do consumo total de combustível do setor, o que explica as IC serem iguais para as curvas que consideram o uso final (IC_{TTW}) e a curso do ciclo de vida (IC_{WTW}). Os outros anos em que há aproximação das curvas, houve também um consumo menor de biocombustíveis.

A partir de 2015, a diferença entre as curvas IC_{WTW} e IC_{TTW} começa aumentar devido ao maior consumo de biocombustíveis, principalmente, de etanol hidratado e biodiesel. O percentual médio da representação de biocombustível no consumo entre os anos de 2015 e 2018 foi de 32%, devido ao crescimento de 39% no consumo do etanol hidratado e de 30% no consumo de biodiesel no ano de 2018, enquanto o consumo de gasolina reduziu 13% e o diesel 2%.

Portanto, essa análise é importante para tornar transparente a real variação IC do setor de transporte com a inserção de energias renováveis e limpas, bem como os possíveis impactos da sua variação na meta estabelecida pelo Brasil no Acordo de Paris, já que GEE possuem ação global, sendo necessária então a análise que considere a emissão de todo o ciclo de vida e sua comparação com as emissões de uso final.

5 CONCLUSÃO

O Brasil necessita atender as metas estabelecidas no acordo de Paris. O compromisso firmado estabelece a necessidade de redução de emissões de GEE de 37% até 2025, e de 43% até 2030, em relação ao ano base de 2005.

O setor de transporte é responsável, no Brasil, pela emissão de 14% de CO_{2e}, que, apesar de estar abaixo da média mundial de 24%, em 2016, aponta para a dependência do setor de transportes à utilização de combustíveis fósseis. Desta forma, há grande relevância na implementação de medidas de mitigação na busca da redução das emissões de GEE e do consumo de energia, por meio de ações que promovam o aumento da EE e redução da IC do setor de transporte.

Nesse contexto, este estudo objetivou desenvolver um método para o cálculo da IC do setor de transporte, de modo a realizar uma análise histórica desse indicador, buscando contribuir para a aplicação do método MRV. Essa contribuição permite que, a partir de uma análise do impacto na IC do setor de transporte provenientes da aplicação de medidas de mitigação e de fatores históricos, permitam estabelecer o cenário base e definir o cenário tendencial, etapas necessárias à aplicação do método MRV, destacando a importância do monitoramento e relato do indicador de IC.

Para que essa análise do indicador de IC fosse possível, foi necessário estabelecer a unidade de medida adequada para a IC do setor de transporte, por meio de uma RSL e uma pesquisa documental. A RSL identificou diversas unidades que apontam para uma falta de padronização dos estudos, que dificulta a realização de análises comparativas. Estabeleceu-se, portanto, o levantamento de estudos que tivessem utilizado métodos específicos para o setor de transporte, de modo a dar menor relevância aos estudos que consideravam diversos setores ou que fizessem apenas análises econômicas.

O resultado da revisão da literatura mostrou-se positivo ao ser identificado que os estudos que aplicavam métodos específicos para o setor de transporte e utilizavam também uma abordagem mais detalhada (*Bottom-up*), realizaram o cálculo da IC do setor de transporte considerando a emissão de CO_{2e} por atividade de transporte.

Esta unidade de medida converge com aquela utilizada pelo *International Transport Forum* e para o cálculo da IE (MJ/t.km), como identificado em estudos da Agência Internacional de

Energia, que também possui o denominador considerando o momento de transporte. Como o objetivo de realizar uma análise histórica da IC em que se buscava utilizar a IE como indicador auxiliar dessa análise, a unidade de medida escolhida para a elaboração do método desenvolvido foi emissão CO₂e/t.km e emissão de CO₂e/p.km.

A análise por modo e por atividade (carga e passageiro) identificou fatores políticos históricos que geraram variação no consumo de energia, na participação dos biocombustíveis na matriz energética, e na atividade de transporte que impactaram na IC. A análise histórica identificou e apresentou de forma quantitativa que a principal medida de mitigação que impactou na IC do setor de transporte no Brasil foi a adoção dos biocombustíveis, tanto para o transporte de carga quanto para o de passageiros, e medidas que buscavam o aumento da Eficiência Energética.

Na análise da IC total da atividade de transporte para o uso final (IC_{TTW}), foi identificado o impacto da divisão modal, que tem o modo rodoviário como principal representante, tanto para carga, com participação de cerca de 60%, quanto para passageiros, com participação superior a 90%, durante o período de análise, de 1990 até 2018. Essa divisão foi moldada a partir de maiores investimentos realizados no transporte rodoviário em detrimento de outros modos. Esse investimento, no entanto, promoveu um desequilíbrio da divisão modal que gera uma redução da eficiência energética do sistema.

O transporte rodoviário de carga possui menor capacidade em relação ao transporte aquático e ao ferroviário, apresentando menor eficiência no transporte de carga a longas distâncias. Para o transporte de passageiros, medidas identificadas no período de análise estão relacionadas aos investimentos no setor automobilístico, que buscava incentivar a compra de automóveis, na busca de promover o crescimento do setor devido a crises econômicas, promovendo, no entanto, a redução a eficiência do sistema, já que o aumento da frota de automóveis particulares, devido a sua baixa taxa de ocupação por veículo, implicou no aumento do consumo de combustível. No entanto, esse crescimento no consumo não é acompanhado na mesma proporção pela atividade de transporte e, conseqüentemente, provoca o aumento da IE.

Para que o impacto da adoção de energias renováveis e limpas na variação da IC do setor de transportes pudesse se tornar mais evidente, foi realizada uma análise comparativa entre a IC_{TTW} com a IC para todo ciclo de vida (IC_{WTW}). No entanto, vale ressaltar que, apesar da utilização de biocombustíveis impactar na redução da IC, devido ao seu poder calorífico ser menor do que o de combustíveis fósseis, implicou no aumento da IE. Ainda que o uso de biocombustíveis

contribua para a redução dos GEE e, conseqüentemente, do fenômeno do aquecimento global, deve-se levar em consideração outro aspecto, relacionado às emissões de poluentes atmosféricos, que causam danos à saúde humana e reduzem a qualidade do ar.

No que concerne à tendência mundial de eletrificação da frota rodoviária, que representa o modo mais utilizado tanto para o transporte de carga quanto de passageiros, sendo o maior responsável pelo consumo de combustíveis fósseis, a aplicação desse método de análise permitirá quantificar o impacto de uma possível futura eletrificação da frota brasileira na IC do transporte.

Este estudo apresentou duas limitações, a primeira referente à análise da IC considerando o ciclo de vida, devido à ausência de um FE que representasse apenas a emissão da geração de energia, isto é, desconsiderando o transporte e distribuição dos combustíveis e biocombustíveis, de modo a evitar a dupla contagem. Para tal, seria necessário que fosse estabelecido, no Brasil, a participação do transporte de combustível na análise do ciclo de vida para evitar dupla contagem, por região do país (de acordo com a distância percorrida).

A segunda limitação refere-se à escassez de dados para alguns modos, tais como para o transporte aéreo de carga, ferroviário de passageiros, e o transporte aquático. Portanto, para esses modos (e atividades) especificamente, não foi possível identificar fatores políticos históricos, nem medidas de mitigação, que pudessem ser correlacionados às variações da IC em todo o período de análise. A escassez de dados pode estar relacionada a baixa participação na divisão modal: em média 0,1% para o modo aéreo de carga; em média 6% para o transporte aquático de carga e de em média 0,06% para o transporte aquático de passageiros; e de 1,8% para o transporte ferroviário de passageiro no período analisado.

Portanto, vale ressaltar a importância do monitoramento e do relato de indicadores de forma periódica, de modo a acompanhar as variações e verificar quais medidas e fatores estão correlacionados à essas variações. Se houvesse a aplicação Método MRV, com monitoramento, relato e verificação anual, a análise histórica seria estabelecida pouco a pouco, bem como o cenário base e o cenário tendencial estariam mais bem construídos e embasados, minimizando a dificuldade de associação entre medidas aplicadas e fatores históricos com as variações da IC e IE do setor de transporte, sobretudo quando se trata de modos com pouca representatividade na divisão modal.

Sugere-se que seja desenvolvido em trabalhos futuros o ranqueamento e análise da IC do Brasil em relação a outros países, tais como outros integrantes dos BRICs, países da União Europeia e Estados Unidos. A análise da IC do setor de transporte para outros países permite entender como o Brasil está progredindo, e identificar quais medidas de mitigação adotadas em outros países poderiam ser adotadas e adaptadas para a realidade brasileira, de modo a contribuir para a redução das emissões dos GEE em atendimento às NDCs.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEAR. ([s.d.]) Panorama da Aviação Brasileira - Dados e Estatísticas. Obtido 5 de setembro de 2019, de <http://panorama.abear.com.br/dados-e-estatisticas/series-historicas/>
- Almeida, I. R. P., Costa, M. G. da, Gonçalves, D. N. S., e D'Agosto, M. de A. (2017) Análise do Momento de Transporte Rodoviário de Carga no Brasil de 1970 a 2016. *XXXI Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET* (p. 844–855). Recife.
- ANAC. (1998) *EMPRESAS NACIONAIS DE TRANSPORTE AÉREO REGULAR DE ÂMBITO NACIONAL*. 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. (1999) *ANUÁRIO DO TRANSPORTE AÉREO*. Brasília, DF. 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.
- ANAC. (2013a) *Transporte Aéreo Internacional de Carga*. (Vol. 112).
- ANAC. (2013b) *Transporte aéreo no Brasil : preço e qualidade*. Brasília, DF.
- ANAC. (2015) *Plano de Ação para a Redução das Emissões de Gases de Efeito Estufa da Aviação Civil Brasileira*. Brasília, DF.
- Andreoni, V., e Galmarini, S. (2012) European CO₂emission trends: A decomposition analysis for water and aviation transport sectors. *Energy*, 45(1), 595–602. doi:10.1016/j.energy.2012.07.039
- ANFAVEA. (2019) *Anuário da Indústria Automobilística Brasileira*. São Paulo. Obtido de <http://www.virapagina.com.br/anfavea2019/6/>
- Ang, B. W. (2004) Decomposition analysis for policymaking in energy: Which is the preferred method? *Energy Policy*, 32(9), 1131–1139. doi:10.1016/S0301-4215(03)00076-4
- Ang, B. W. (2005) The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide. *Energy Policy*, 33(7), 867–871. doi:10.1016/j.enpol.2003.10.010
- ANP. (2017a) Dados Estatísticos, 2017. *Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis*. Obtido 19 de junho de 2019, de <http://www.anp.gov.br/wwwanp/distribuicao-e-revenda/leiloes-de-biodiesel/leiloes-de-biodiesel-interna>
- ANP. (2017b) Dados Estatísticos, 2017. *Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis*.
- ANTT. ([s.d.]) Histórico - Concessões Rodoviárias. Obtido de http://www.antt.gov.br/rodovias/Concessoes_Rodoviaras/Linha_do_Tempo.html

- ANTT. (2012) *1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas do Transporte Ferroviário de Cargas*. Brasília, DF.
- ANTT. (2016) *EVOLUÇÃO DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGAS*. Brasília, DF. Obtido de http://www.antt.gov.br/ferrovias/arquivos/Evolucao_do_Transporte_Ferrovionario.html
- 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
- Ben Abdallah, K., Belloumi, M., e De Wolf, D. (2015) International comparisons of energy and environmental efficiency in the road transport sector. *Energy*, 93, 2087–2101. doi:10.1016/j.energy.2015.10.090
- BNDES. (2008) *PANORAMA DO SETOR AUTOMOTIVO: AS MUDANÇAS ESTRUTURAIS DA INDÚSTRIA E AS PERSPECTIVAS PARA O BRASIL*.
- Brander, M., Davis, G., Sood, A., Wylie, C., Haughton, A., e Lovell, J. (2011) *Technical Paper / Electricity-specific emission factors for grid electricity*. doi:10.1021/es0400537
- Brasil, B. C. do. ([s.d.]) Plano Real. Obtido 21 de julho de 2019, de <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/planoreal>
- Brereton, P., Kitchenham, B. A., Budgen, D., Turner, M., e Khalil, M. (2007) Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain. *Journal of Systems and Software*, 80(4), 571–583. doi:10.1016/j.jss.2006.07.009
- CETESB. (2017) *Qualidade do Ar no Estado de São Paulo*. São Paulo, SP. Obtido de <https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2018/05/relatorio-qualidade-ar-2017.pdf>
- CNT. (2015) *Transporte Aéreo de Passageiros*.
- CNT. (2017) *Transporte Rodoviário - Desempenho do setor, infraestrutura e investimentos*. Brasília, DF.
- Cook, D. J., e Haynes, R. B. (1997) Systematic Reviews: Synthesis of Best Evidence for Clinical Decisions., 287, 1–17. doi:10.1007/s00606-010-0308-z
- D’Agosto, M. de A. (2019) *Transportation, Energy Use and Environmental Impacts*. (1a edição.). Elsevier.
- D’Agosto, M. de A., Gonçalves, D. N. S., e Oliveira, L. D. B. (2017) *Emissão de Gases de Efeito Estufa – 2050 : Implicações Econômicas e Sociais do Cenário de Plano Governamental*.
- D’Agosto, M. de A., Schmitz, D. N., e Goes, G. V. (2018) *Projeto IES – Brasil 2050 Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de Emissão de Gases de Efeito Estufa – GEE no Brasil até 2050. Setor de Transportes: Referência e 1,5°C*.
- Daldoul, M., e Dakhlaoui, A. (2016) Decomposition of carbon dioxide emission from highway transportation in Tunisia Manel Daldoul * Ahlem Dakhlaoui., 39(6), 432–443.

- DeCicco, J. M. (2013) Factoring the car-climate challenge: Insights and implications. *Energy Policy*, 59, 382–392. doi:10.1016/j.enpol.2013.03.052
- DNIT. ([s.d.]) Histórico do Rodoviarismo. Obtido 25 de agosto de 2019, de <http://www1.dnit.gov.br/historico/>
- DNIT. (2015) Histórico Ferroviario. Obtido 16 de junho de 2019, de <https://189.9.128.64/ferrovias/historico/historico>
- EEA. (2012) *Energy efficiency and energy consumption in the household sector 2011. October*. Copenhagen. Obtido de <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/energy-efficiency-and-energy-consumption-2/assessment-2>
- Eggink, E. (2013) *Carbon Dioxide Intensity Indicators: A comparison of carbon intensity indicators to benchmark companies within a sector*. Utrecht University.
- EPE. (2018) *Balanço Energético Nacional de 2017*. (Vol. 1). Rio de Janeiro. Obtido de http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf
- EPE. (2019) *Balanço Energético Nacional - Ano Base 2018*. Rio de Janeiro, RJ.
- EPE, E. de P. E. (2017) *Balanço energético Nacional 2016*. (Vol. 72). Obtido de www.dgeg.pt
- Ferreira, J. C. (2017) Um breve histórico da aviação comercial brasileira. *Congresso Brasileiro de Historia Econômica - Conferência Internacional de Historia de Empresas*. Niteroi, RJ.
- Francisco, A. I. da C. (2015) *Decomposição das emissões de CO2 relacionadas com a energia no setor da saúde*. Universidade de Aveiro.
- GEIPOT. (2000) Anuario Estatístico - Transporte Aéreo. Obtido de <http://www.geipot.gov.br/anuario2001/aeroviario/aero.htm>
- GIZ. (2018) *Efi ciência Energética na Mobilidade Urbana*. Obtido de <https://eemobilidadeurbana.com.br/>
- Goldenstein, L. (1998) Repesando a dependência após o Plano Real. *SciELO*, 12(33), 131–135.
- Gonçalves, D. N. S., e D’Agosto, M. de A. (2017) *Cenários prospectivos futuros para o uso de energia em transportes no Brasil e as emissões de Cenário Business as Usual (BAU) - 2050 Relatório Final*.
- Greening, L. A., Ting, M., e Davis, W. B. (1999) Decomposition of aggregate carbon intensity for freight: Trends from 10 OECD countries for the period 1971-1993. *Energy Economics*, 21(4), 331–361. doi:10.1016/S0140-9883(99)00010-9
- GVces. (2015) *APLICAÇÃO DE INDICADORES DE INTENSIDADE EM INSTRUMENTOS ECONÔMICOS*. São Paulo, p.143.
- Horne, R., Grant, T., e Verghese, K. (2009) *Life Cycle Assessment : Principles , Practice and Prospects Principles*

, *Practice and Prospects*. doi:10.1071/9780643097964

- Ibict. Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia - Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação. ([s.d.]) Avaliação do Ciclo de Vida. Obtido 7 de abril de 2019, de <http://acv.ibict.br/>
- IBTS. (2019) *Transportes no Brasil – Panorama e Cenários Prospectivos para atendimento da Contribuição Nacionalmente Determinada*. Rio de Janeiro.
- ICCT. (2017) *Emerging Best Practices for Electric Vehicle Charging Infrastructure. ICCT White Paper*. Obtido de www.theicct.org
- IEA. (2018a) *CO2 emissions from fuel combustion: Overview. International Energy Agency*. Obtido de <https://www.iea.org/about/contact/>
- IEA. (2018b) *Electricity Information 2018: Overview*. Obtido de <https://webstore.iea.org/electricity-information-2018-overview>
- IEA. (2018c) *Global EV Outlook 2018: Towards cross-modal electrification. Global EV Outlook 2018*. doi:10.1787/9789264302365-en
- IEA. (2019) *Transport Tracking Clean Energy Progress*. Obtido 25 de agosto de 2019, de <https://www.iea.org/tcep/transport/>
- IPCC. (2001) *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Climate Change 2001: The Scientific Basis*. doi:10.1256/004316502320517344
- IPCC. (2006) *Mobile Combustion BT - 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 2(3), 3.1-3.78. Obtido de papers2://publication/uuid/9C9A9763-5D27-44C9-8AE7-195E79565B60
- IPCC. (2007) *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change*.
- IPCC. (2014) *Climate change 2014. Synthesis report. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland. doi:10.1017/CBO9781107415324
- IPCC. (2016) *Global Warming Potential Values. Fifth assesment. Greenhouse Gas Protocol (Vol. 2014)*. Obtido de ghgprotocol.org/.../Global-Warming-Potential-Values (Feb 16 2016).pdf
- IPEA. (2010) *GARGALOS E DEMANDAS DA INFRAESTRUTURA FERROVIÁRIA E OS INVESTIMENTOS DO PAC: MAPEAMENTO IPEA DE OBRAS FERROVIÁRIAS*. Rio de Janeiro.
- ITF. (2019) *ITF Transport Outlook 2019*. doi:10.1787/transp_outlook-en-2019-en
- Ji, X., e Chen, G. Q. (2010) Unified account of gas pollutants and greenhouse gas emissions: Chinese transportation 1978-2004. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 15(9), 2710–2722. doi:10.1016/j.cnsns.2009.10.013

- Jiang, R., Li, R., e Wu, Q. (2019) Investigation for the decomposition of carbon emissions in the USA with C-D function and LMDI methods. *Sustainability (Switzerland)*, 11(2). doi:10.3390/su11020334
- Kamakaté, F., e Schipper, L. (2009) Trends in truck freight energy use and carbon emissions in selected OECD countries from 1973 to 2005. *Energy Policy*, 37(10), 3743–3751. doi:10.1016/j.enpol.2009.07.029
- Kaufmann, G. O., Rodrigues, E. C. C., e Oliveira, M. M. V. (2009) Transporte Aéreo De Carga : Análise do Setor e Perspectivas. *Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 1–14. Obtido de logística, transporte aéreo, mercado de carga aérea
- La Rovere, E. L., Dubeux, C. B. S., Wills, W., D'Agosto, M. de A., Gonçalves, D. N. S., Goes, G. V., Hebeda, O., Pereira, A. O. J., Castro, G., Hargraves, F., Walter, M. K. C., Loureiro, S. M., Pimenta, T., Gesteira, C., Mendes, I., Reis, C. B., e Ramos, E. M. da S. (2017) *Indicators for Progress Monitoring in the Achievement of NDC Targets in Brazil*.
- Leighty, W., Ogden, J. M., e Yang, C. (2012) Modeling transitions in the California light-duty vehicles sector to achieve deep reductions in transportation greenhouse gas emissions. *Energy Policy*, 44, 52–67. doi:10.1016/j.enpol.2012.01.013
- Liang, Y., Niu, D., Wang, H., e Li, Y. (2017) Factors affecting transportation sector CO₂emissions growth in China: An LMDI decomposition analysis. *Sustainability (Switzerland)*, 9(10). doi:10.3390/su9101730
- Liimatainen, H., e Pöllänen, M. (2013) The impact of sectoral economic development on the energy efficiency and CO₂emissions of road freight transport. *Transport Policy*, 27, 150–157. doi:10.1016/j.tranpol.2013.01.005
- Machado, A. F., e Moreira, M. M. (2001) Os impactos da abertura comercial sobre a remuneração relativa do trabalho no Brasil., (May 2014).
- Mao, X., Yang, S., Liu, Q., Tu, J., e Jaccard, M. (2012) Achieving CO₂ emission reduction and the co-benefits of local air pollution abatement in the transportation sector of China. *Environmental Science and Policy*, 21, 1–13. doi:10.1016/j.envsci.2012.03.010
- McKinsey & Company. (2010) *Estudo do Setor de Transporte Aéreo do Brasil*. (1ª. Edição.). Rio de Janeiro. Obtido de http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/empresa/pesquisa/camada3/capitulo3.pdf%5Cnhttp://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Apoio_Financeiro/Apoio_a_estudos_e_pesquisas/BNDES_FEP/prospeccao/c
- MCTI. (2016) *3ª Comunicação Nacional do Brasil à convenção-quadro das nações unidas sobre Mudança do Clima – Volume III*. Brasília, DF, Brasil.
- Miotti, M., Supran, G. J., Kim, E. J., e Trancik, J. E. (2016) Personal Vehicles Evaluated against Climate Change Mitigation Targets. *Environmental Science and Technology*, 50(20), 10795–10804. doi:10.1021/acs.est.6b00177

- MMA. (2014) *National Inventory of Atmospheric Emissions By Road Automotive Vehicles 2013 - ano base 2012*. Obtido de http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Inventario_de_Emissoes_por_Veiculos_Rodoviaros_2013.pdf
- MME. ([s.d.]) *RenovaBio. Ministério de Minas e Energia*. Obtido 10 de novembro de 2018, de <http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-combustiveis-renovaveis/programas/renovabio/principal>
- Mousavi, B., Lopez, N. S. A., Biona, J. B. M., Chiu, A. S. F., e Blesl, M. (2017) Driving forces of Iran's CO₂ emissions from energy consumption: An LMDI decomposition approach. *Applied Energy*, 206(May), 804–814. doi:10.1016/j.apenergy.2017.08.199
- MTPA. (2018) *Anuário Estatístico de Segurança Rodoviária: 2010 - 2017*. Brasília, DF.
- NTU. (2018) *Anuário NTU 2017-2018*. Brasília, DF.
- Oliveira, C. M. de, e D'Agosto, M. de A. (2017) *Logística - Guia de Referência de Sustentabilidade*. (Vol. 2).
- Petrobras. (2013) *Combustíveis Marítimos - Informações Técnicas*. Obtido de <http://www.petrobras.com.br/minisite/assistenciatecnica/>
- Petrobras. (2014) *Gasolina de Aviação - Informações técnicas*. Obtido de <http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciatecnica/public/downloads/gasolina-de-aviacao-GAV-Informacoes-Tecnicas.pdf>
- Prefeitura de Belo Horizonte. (2019) *Áreas de Carga, Descarga e com Restrições. Prefeitura de Belo Horizonte*. Obtido 20 de julho de 2019, de <https://prefeitura.pbh.gov.br/index.php/bhtrans/carga-urbana/areas-de-carga-descarga-e-com-restricoes>
- Price, L., Zhou, N., Fridley, D., Ohshita, S., Lu, H., Zheng, N., e Fino-Chen, C. (2013) Development of a low-carbon indicator system for China. *Habitat International*, 37(2013), 4–21. doi:10.1016/j.habitatint.2011.12.009
- Rajagopal, D., Vanderghem, C., e Maclean, H. L. (2017) *Life Cycle Assessment for Economists*.
- Silva, A. B., Farias, V. T., e Cerqueira, L. S. (2012) Consumidor de Baixa Renda: Uma Análise dos Fatores que Influenciam a Aquisição de Automóveis em Salvador. *Anais do IX Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia*.
- Sims R., R. Schaeffer, F. Creutzig, X. Cruz-Núñez, M. D'Agosto, D. Dimitriu, M.J. Figueroa Meza, L. Fulton, S. Kobayashi, O., e Lah, A. McKinnon, P. Newman, M. Ouyang, J.J. Schauer, D. Sperling, and G. T. (2014) *8 Transport Coordinating Lead Authors: Lead Authors: Review Editors: Chapter Science Assistant: Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer Contents*. Obtido de <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment->

report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter8.pdf

- Smart Freight Centre. (2016) GLEC Framework for Logistics Emissions Methodologies. *Smart Freight Centre, 1*, 88. Obtido de <http://www.smartfreightcentre.org>
- Tolón-Becerra, A., Lastra-Bravo, X. B., e Sotelo-Navalpotro, J. A. (2012) Territorial distribution of transport emission reduction targets from an environmental, economic and social viewpoint. *Environmental Science and Policy, 16*, 97–113. doi:10.1016/j.envsci.2011.11.008
- Tongwane, M., Piketh, S., Stevens, L., e Ramotubei, T. (2015) Greenhouse gas emissions from road transport in South Africa and Lesotho between 2000 and 2009. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 37*, 1–13. doi:10.1016/j.trd.2015.02.017
- Wang, J., Zhao, T., Xu, X., e Zhang, X. (2016) Exploring the changes of energy-related carbon intensity in China: an extended Divisia index decomposition. *Natural Hazards, 83*(1), 501–521. doi:10.1007/s11069-016-2326-9
- World Bank. (2009) *Air Freight: A Market Study with Implications for Landlocked Countries. Transport Papers* (Vol. 26). Washington, D.C. Obtido de www.worldbank.org
- Xu, S. C., He, Z. X., Long, R. Y., e Chen, H. (2016) Factors that influence carbon emissions due to energy consumption based on different stages and sectors in China. *Journal of Cleaner Production, 115*, 139–148. doi:10.1016/j.jclepro.2015.11.050

APÊNDICE 1

Fatores de Emissão (*Tier 1*) do modo Rodoviário, por tipo de combustível

t/TJ	Rodoviário				
	Gasolina ¹	Gasolina ²	Etanol	GNV	Diesel
CO2	69,3	69,3	0	56,1	74,1
CH4	0,033	0,025	0,018	0,092	0,0039
N2O	0,0032	0,0008	0,008	0,003	0,0039

Nota: ¹ sem conversor catalítico

² com conversor catalítico

Fatores de Emissão (*Tier 1*) para os outros modos de transporte, por tipo de combustível

t/TJ	Aéreo		Ferroviário	Aquático	
	Gasolina Aviação	Querosene	Diesel	Óleo combustível	Diesel
CO2	70	71,5	74,1	77,4	74,1
CH4	0,0005	0,0005	0,005	0,007	0,007
N2O	0,002	0,002	0,0006	0,002	0,002

Potencial de Aquecimento Global - GWP

Gases do efeito estufa	Quarto Relatório de Avaliação (IPCC, 2007)	Quinto Relatório de Avaliação (IPCC, 2014)
CO ₂	1	1
CH ₄	25	28
N ₂ O	298	265

Fatores de escala de ciclo de vida aplicados para fatores de emissão da energia utilizada no transporte no Brasil

Combustível	kg CO ₂ / l combustível			kg CO _{2e} / l combustível		
	WTT CO ₂	TTW CO ₂	WTW CO ₂	WTT CO _{2e}	TTW CO _{2e}	WTW CO _{2e}
Óleo Combustível	0,37	3,10	3,47	0,38	3,13	3,51
Óleo Diesel embarcação				0,30	2,71	3,01
Querosene de aviação	0,54	2,52	3,06	0,54	2,54	3,08
Gasolina de aviação	0,31	2,23	2,54	0,31	2,23	2,55
Gasolina	0,31	2,23	2,55	0,33	2,33	2,66
Diesel	0,30	2,63	2,93	0,30	2,67	2,97
GNV (l/m ³)	0,08	2,00	2,08	0,08	2,00	2,08
Biodiesel	-1,68	2,43	0,75	-1,71	2,46	0,76
Etanol Anidro	-1,08	1,53	0,45	-1,11	1,57	0,46
Etanol Hidratado	-1,04	1,46	0,42	-1,07	1,50	0,43
Eletricidade (em Kg CO ₂ / kWh)			0,088854			

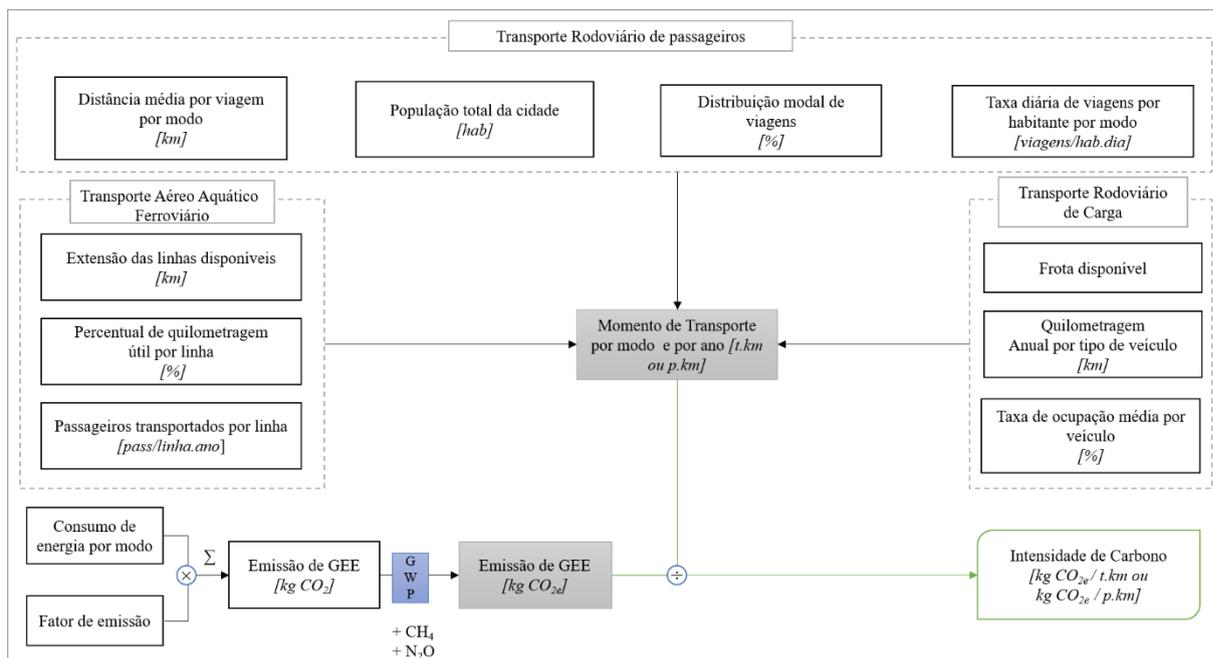
Fonte: Elaboração própria com base em Brander *et al.* (2011); CETESB (2017); EPE (2019); IPCC (2006); MCTI, (2016); MMA (2014); Petrobras (2013); Smart Freight Centre (2016)

Legenda:

	Empresa de Pesquisa Energética - EPE
	Calculado com base em Petrobras (2013); Smart Freight Centre (2016)
	CETESB (2017); e MCTI (2019)
	ANAC (<i>Tier 1</i> - IPCC)
	MMA (2014)
	IEA <i>apud</i> Brander <i>et al.</i> (2011)

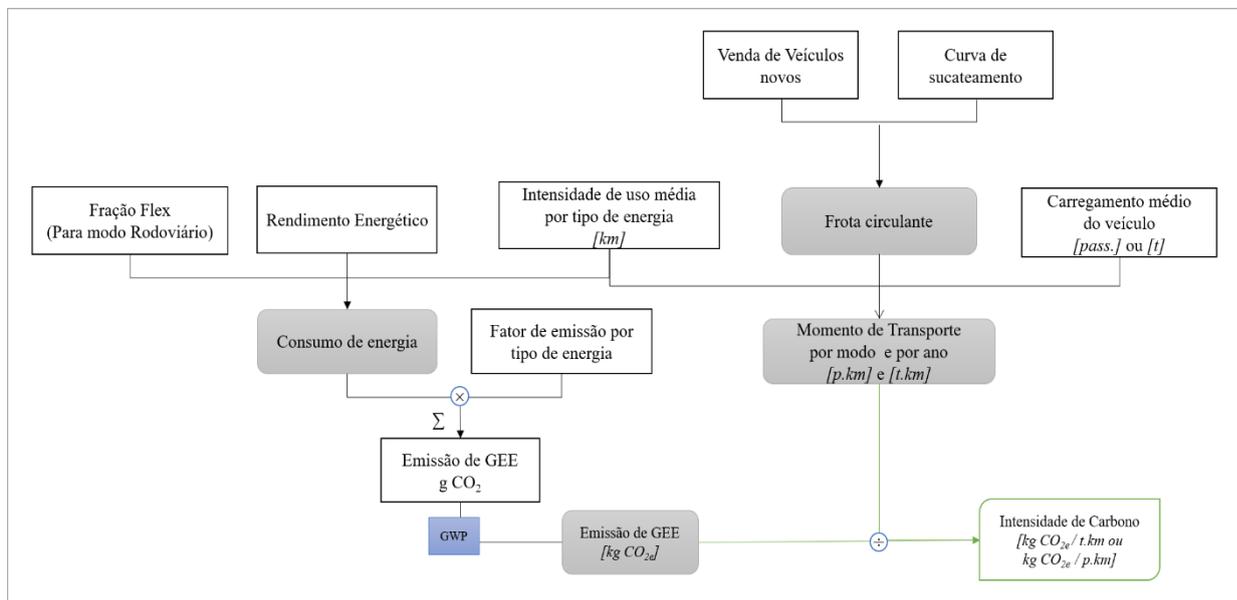
APÊNDICE 2

Método da Fase 3 para a abordagem *Top-down*



Fonte: Elaborado pela autora com base em GIZ (2018) e IBTS (2019)

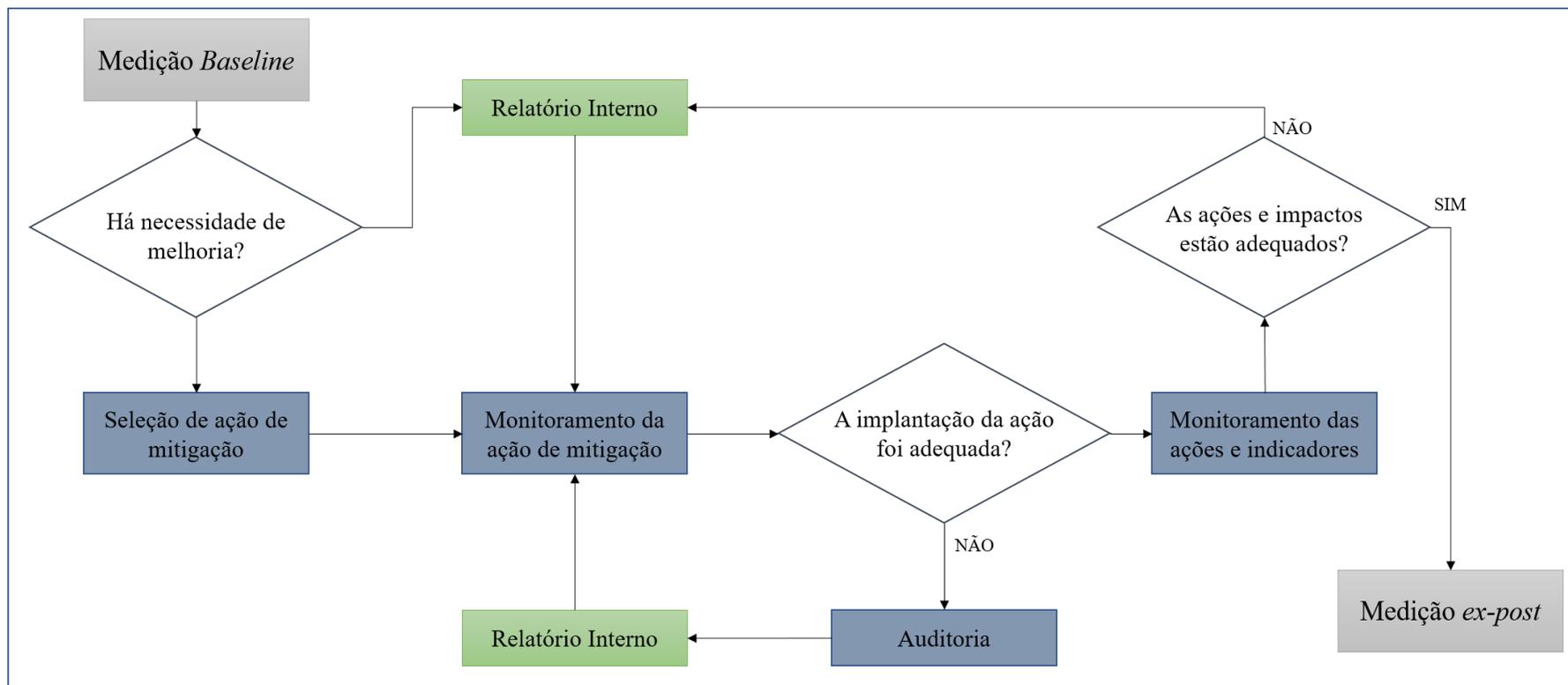
Método da Fase 3 para a abordagem *Bottom-up*



Fonte: Elaborado pela autora com base em GIZ (2018) e IBTS (2019)

APÊNDICE 3

Etapa de Monitoramento do método M-R-V



Fonte: Adaptado de GIZ (2018)