

Projeto IES – Brasil 2050

*Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de
Emissão de Gases de Efeito Estufa – GEE no Brasil
até 2050*

Cenário de Referência e Cenário 1,5°C

Centro de Estudos Integrados sobre Meio
Ambiente e Mudanças Climáticas
Centro Clima/COPPE/UFRJ

Apoio:

Instituto Clima e Sociedade (iCS) e WWF-Brasil

COORDENAÇÃO GERAL: Emilio Lèbre La Rovere

COORDENAÇÃO TÉCNICA: Carolina B.S. Dubeux e William Wills

MODELAGEM MACROECONÔMICA: William Wills

ESTUDOS SETORIAIS

Setor de Transporte: Márcio de Almeida D'Agosto, Daniel Neves Schmitz Gonçalves e George Vasconcelos Goes (Laboratório de Transporte de Carga –LTC/COPPE/UFRJ)

Setor Industrial: Otto Hebeda

Setor Energético: Amaro Olímpio Pereira Junior e Gabriel Castro

Setor de Agricultura, Floresta e Outros Usos da Terra (AFOLU): Michele Karina Cotta Walter, Carolina B.S. Dubeux e Isabella da Fonseca Zicarelli

Setor de Resíduos: Saulo Machado Loureiro e Tairini Pimenta

Avaliação microeconômica: Carolina Grottera

Cobenefícios: Daniel Oberling

Integração dos Modelos Energéticos de Demanda: Claudio Gesteira

APOIO: Carmen Brandão Reis

EDITORAÇÃO: Elza Maria da Silveira Ramos

Citação: D'Agosto, M. A., Schmitz, D.N. e Goes, G., V., (2018) Cenários de Emissão de Gases de Efeito Estufa até 2050 no Setor de Transportes: Referência e 1,5°C, in Rovere, E. L.L.; Wills, W.; Dubeux, C. B. S; Pereira Jr, A. O.; D'Agosto, M. A; Walter, M. K. C; Grottera, C.; Castro, G.; Schmitz, D.; Hebeda, O.; Loureiro, S. M.; Oberling, D; Gesteira, C.; Goes, G.V.; Zicarelli, I.F.; e Oliveira, T.J.P (2018). Implicações Econômicas e Sociais dos Cenários de Mitigação de GEE no Brasil até 2050: Projeto IES-Brasil, Cenário 1.5 ° C. COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.

PROJETO IES-Brasil – 2050

**Centro de Estudos Integrados sobre Meio Ambiente e
Mudanças Climáticas**

(Centro Clima/COPPE/UFRJ)

**Cenários de Emissão de GEE – 2050
(Referência e 1,5°C)**

Transporte

Relatório Técnico

Maio de 2018

Autores:

Márcio de Almeida D'Agosto
Daniel Neves Schmitz Gonçalves
George Vasconcelos Goes

Sumário

1.	Apresentação do setor.....	1
2.	Objetivo do Capítulo	2
3.	Metodologia usada nas estimativas	2
3.1.	Abordagem qualitativa.....	3
3.2.	Abordagem quantitativa	4
3.3.	Método Top-Down.....	5
3.3.1.	Coleta de dados.....	8
3.3.2.	Análise de consistência dos dados.....	8
3.3.3.	Cálculo da eficiência energética.....	8
3.3.4.	Consolidação dos dados.....	9
3.3.5.	Levantamento e estimativas da População e PIB	9
3.4.	Método <i>Bottom-up</i>	12
3.4.1.	Procedimento para cálculo da frota circulante.....	15
3.4.2.	Procedimento para cálculo da intensidade de uso.....	16
3.4.3.	Procedimento para cálculo do consumo de combustível.....	18
3.4.4.	Procedimento para estimativa do momento de transporte.....	18
3.4.5.	Procedimento para cálculo da emissão de GEE	20
3.4.6.	Procedimento para veículos convertidos para uso de GNV	26
4.	Premissas gerais.....	27
4.1.1.	Transporte de Passageiros	27
4.1.2.	Transporte de Carga.....	31
5.	Cenário de referência	35
5.1.	Hipóteses	35
5.1.1.	Divisão Modal.....	35
5.1.2.	Frota	36
5.1.3.	Uso de Energia	39
5.2.	Resultados.....	43
6.	Cenário 1,5°C	43
6.1.	Hipóteses	44
6.1.1.	Divisão Modal.....	44
6.1.2.	Frota	45
6.1.3.	Uso de Energia	48
6.2.	Investimentos.....	51
6.3.	Resultados.....	52
6.4.	Custos de mitigação das medidas consideradas.....	52
7.	Comparação dos resultados	54
7.1.	Mitigações.....	54
8.	Prospecção Tecnológica para a Construção de um Cenário Disruptivo	58
9.	Referências Bibliográficas	59
	ANEXO 1	61

Tabelas

Tabela 1.	Evolução do consumo energético do transporte no período 2000- 2014 (10^3 Tep)	1
Tabela 2.	Fator de emissão de GEE por tipo de combustível (kg/l e kg/TJ).....	12
Tabela 3.	Fatores de emissão de CH_4 por categoria e por combustível para automóveis e veículos leves (g/km).....	21
Tabela 4.	Fatores de emissão de CH_4 para motores diesel (g/km).....	23
Tabela 5.	Fatores de emissão de N_2O por categoria para veículos do ciclo Diesel (g/km).....	23
Tabela 6.	Fatores de emissão de N_2O e CH_4 para veículos movidos a GNV (g/km).....	23
Tabela 7.	Fatores de emissão de CH_4 para motocicletas (g/km).....	23
Tabela 8.	Fatores de emissão variáveis de automóveis nos anos (g/km) – gasolina C.	23
Tabela 9.	Fatores de emissão variáveis de automóveis nos anos (g/km) – álcool hidratado	24
Tabela 10.	Fatores de emissão variáveis de automóveis nos anos (g/km) – flex e híbrido – gasolina C.....	24
Tabela 11.	Fatores de emissão variáveis de automóveis nos anos (g/km) – flex e híbrido – álcool hidratado.....	24
Tabela 12.	Fatores de emissão variáveis de comerciais leves nos anos (g/km) – gasolina C.	25
Tabela 13.	Fatores de emissão variáveis de comerciais leves nos anos (g/km) – álcool hidratado.	25
Tabela 14.	Fatores de emissão variáveis de comerciais leves nos anos (g/km) – flex e híbrido – gasolina C.	25
Tabela 15.	Fatores de emissão variáveis de comerciais leves nos anos (g/km) – flex e híbrido – álcool hidratado.....	25
Tabela 16.	Tipos e percentuais de veículos rodoviários de passageiros, ano base 2016.	27
Tabela 17.	Intensidade de uso de referência adotada por tipo de veículos de passageiro.	28
Tabela 18.	Rendimento e melhoria de eficiência energética dos veículos rodoviários de passageiro (ciclo Otto).....	29
Tabela 19.	Rendimento energético dos veículos rodoviários de passageiro (GNV).....	30
Tabela 20.	Rendimento energético dos veículos rodoviários de passageiro (híbrido diesel-elétrico).....	30
Tabela 21.	Evolução do rendimento energético por modo de transporte, em kJ/pass.km.	31
Tabela 22.	Intensidade de uso de referência adotada por tipo de veículos de carga	32
Tabela 23.	Rendimento e melhoria de eficiência energética dos veículos rodoviários de carga (ciclo Diesel).....	32
Tabela 24.	Evolução do rendimento energético por modo de transporte, em kJ/t.km.....	33
Tabela 25.	Potencial de melhorias em eficiência energética de todos os modos de transportes no Cenário de Referência	41
Tabela 26.	Evolução do momento de transporte no Cenário de Referência	43
Tabela 27.	Evolução da demanda energética no Cenário de Referência (10^3 tep)	43
Tabela 28.	Investimento total por período para as principais medidas no Cenário $1,5^\circ C$	51
Tabela 29.	Evolução do momento de transporte no Cenário $1,5^\circ C$	52
Tabela 30.	Evolução da demanda energética no Cenário $1,5^\circ C$ (10^3 tep).	52
Tabela 31.	Evolução das emissões de CO_2 e nos Cenário de Referência e $1,5^\circ C$ (Gg).....	54
Tabela 32.	Principais medidas de mitigação levantadas para a construção de um Cenário Disruptivo.	58

Figuras

Figura 1.	Procedimento adotada para estimar o consumo de energia e emissões de GEE por meio da metodologia <i>top-down</i>	7
Figura 2.	Procedimento adotado para estimar o consumo de energia e emissões de CO ₂ por meio da metodologia <i>bottom-up</i>	14

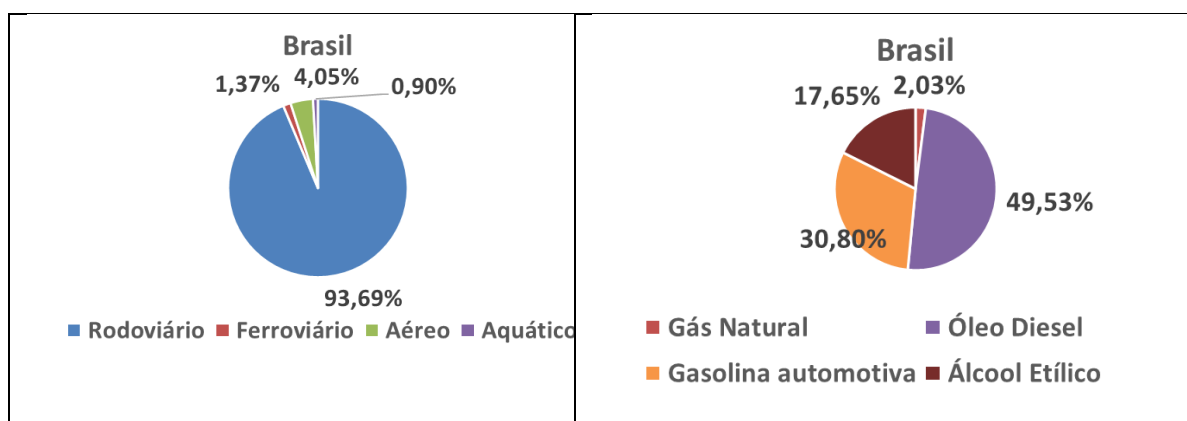
Gráficos

Gráfico 1.	Consumo energético por modo e por tipo de combustível (modo rodoviário) – ano base 2016	1
Gráfico 2.	Evolução do total de emissões para o Cenário de Referência e Cenário 1,5°C.	55
Gráfico 3.	Evolução do total de emissões em relação ao momento para o transporte de passageiros.	55
Gráfico 4.	Evolução do total de emissões em relação ao momento para o transporte de carga.	56
Gráfico 5.	CAPEX total (mi R\$) entre o período 2021-2050.	56
Gráfico 6.	CMA a partir das implantações de medidas descritas no Cenário 1,5°C (em mi R\$).....	57

1. Apresentação do setor

O setor de transportes, responsável por 34,3% do consumo energético brasileiro em 2016, é um dos grandes emissores de Gases de Efeito Estufa (GEE). Quando se observa o consumo de combustível por modo de transportes (Gráfico 1), notam-se diferenças significativas na participação, tendo uma ênfase maior o modo rodoviário em decorrência da infraestrutura de transportes existente.

Gráfico 1. Consumo energético por modo e por tipo de combustível (modo rodoviário) – ano base 2016



Fonte: adaptado de EPE (2017)

A Tabela 1 mostra a evolução do consumo energético por combustível. Destaca-se a participação maior dos combustíveis não renováveis. Somente cerca de 18% da matriz energética rodoviária é composta por combustíveis oriundos de compostos renováveis.

Tabela 1. Evolução do consumo energético do transporte no período 2000- 2014 (10^3 Tep)

Combustível	2000	2005	2010	2014
Óleo diesel (diesel mineral + biodiesel)	24.090,40	26.946,07	34.045,88	41.019,11
Óleo combustível	648,28	805,71	965,57	1.132,77
Gasolina	13.319,32	13.637,76	17.577,96	25.740,02
Querosene	3.123,72	2.553,47	3.187,93	3.650,60
Eletricidade	107,46	102,17	142,93	166,86
Álcool etílico anidro e hidratado	5.820,18	6.963,23	12.032,91	13.008,30
Total	47.109,36	51.008,41	67.953,17	84.717,66

Fonte: EPE (2015)

A Tabela 1 mostra a evolução do consumo de combustível no Brasil entre 2000 e 2014. Observa-se que os consumos de diesel e gasolina cresceram acentuadamente (70% e 93% respectivamente). A

demanda por querosene, eletricidade, etanol e óleo combustível cresceu em 17%, 55%, 124% e 75% respectivamente. Em todo o setor de transportes, nota-se que a demanda agregada por combustíveis teve um crescimento de 80%.

2. Objetivo do Capítulo

O presente capítulo tem como objetivo calcular a demanda energética e emissões do Cenário de Referência e do Cenário 1,5°C até o ano de 2050. Especificamente, identificar o abatimento de CO₂e e o consumo energético após a adoção de investimentos baseados em infraestrutura, políticas voltadas ao melhoramento da eficiência energética e uso de combustíveis alternativos (p. ex. bioquerosene e eletricidade) do setor.

As seções seguintes descrevem a abordagem metodológica utilizada para o levantamento e projeção dos cenários futuros com vista no consumo e emissões.

3. Metodologia usada nas estimativas

Nesta seção são apresentadas a metodologia, premissas, hipóteses adotadas e os resultados do Cenário NDC e Cenário 1,5°C para o setor de transportes, no que tange às estimativas da evolução de sua atividade (passageiro e carga), do seu consumo de energia e de suas respectivas emissões de GEE até o ano de 2050.

Conforme os objetivos deste estudo, optou-se por realizar uma combinação metodológica de pesquisas do tipo exploratória e explicativa, considerada por Freitas e Jabbour (2011) como uma forma robusta de se produzir conhecimento. Esses dois tipos de pesquisa foram escolhidos, tendo em vista que uma pesquisa exploratória pode proporcionar maior familiaridade com o problema e uma pesquisa explicativa busca a identificação de fatores que contribuem para a ocorrência do fenômeno, além de explicar a razão dos acontecimentos (GIL, 2008). Para analisar os fatos e confrontá-los, sob o ponto de vista teórico e sob o ponto de vista da realidade, necessita-se traçar um modelo conceitual e operativo da pesquisa. Tal modelo, refere-se ao planejamento da pesquisa em sua dimensão mais ampla, com ênfase na abordagem da pesquisa, se qualitativa e/ou quantitativa, métodos e procedimentos técnicos de coleta e análise dos dados (GIL, 2008).

No tocante à abordagem da pesquisa, optou-se por realizar uma pesquisa quantitativa, definindo de forma clara as variáveis para obter uma medição precisa dos componentes do problema

abordado. Além disso, complementou-se o trabalho com uma pesquisa qualitativa, buscando verificar o fenômeno por meio do seu próprio estudo (Kirk e Miller, 1986).

Quanto aos procedimentos técnicos para coleta de dados, realizou-se uma pesquisa bibliográfica baseada em livros e artigos científicos e uma pesquisa documental baseada em relatórios e documentos técnicos. Ambas as pesquisas tiveram como objetivos: (1) levantar dados históricos e atuais do setor de transportes brasileiro; (2) identificar estudos de projeções de cenários futuros nacionais e internacionais realizados por entidades públicas e/ou privadas; (3) levantar informações sobre eficiência energética para o setor de transporte e (4) identificar possibilidade de mudança de comportamento dos usuários de transporte, dentre outras informações.

Ademais, fez-se uma pesquisa junto a especialistas da área de transporte e energia com o propósito de ratificar as premissas adotadas neste estudo. Foram realizados três workshops, um em 2016 e dois em 2017. Na seção de transportes, houve discussões entre os profissionais com experiência notoriamente reconhecida na área de transporte, mobilidade e energia, com trabalhos já publicados sobre a temática tratada neste estudo.

Quanto aos procedimentos técnicos para análise dos dados levantados nos livros, artigos científicos, relatórios e documentos técnicos, utilizaram-se ferramentas matemáticas para estabelecer a relação entre as variáveis consideradas na construção dos cenários. Os resultados obtidos foram comparados entre si a fim de verificar a necessidade de ajuste ou calibração.

Salienta-se que em função do amplo horizonte de projeção (33 anos) e da quantidade de variáveis existentes no modelo, os resultados são projeções baseadas nas premissas escolhidas. Isto posto, podem sofrer alterações em função de situações futuras imponderáveis, sendo necessária a revisão periódica deste trabalho.

3.1. Abordagem qualitativa

Para a abordagem qualitativa, utilizou-se o método ASIF, que foi introduzido pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*) em seu primeiro relatório em 1991 e considera 4 linhas de atuação para reduzir o consumo de energia fóssil nos transportes e, conseqüentemente, a emissão de GEE, além da emissão de poluentes atmosféricos, promovendo benefícios ambientais e benefícios sociais indiretos. Estas linhas de atuação são: redução da atividade de transporte (A - “*activity*”), oferta de infraestrutura (S - “*structure*”),

diminuição da intensidade energética (I - “*intensity*”) e escolha de fontes de energia de baixo teor de carbono (F - “*fuel*”) (Schipper *et al.*, 2000).

As linhas de atuação que consistem na redução da atividade de transporte e na oferta de infraestrutura podem estar relacionadas à mudança no comportamento da população quanto à escolha por modos de transporte. As linhas de atuação que consistem na diminuição da intensidade energética e na escolha de fontes de energia de baixo teor de carbono dependem diretamente da utilização de tecnologia.

O método ASIF está em linha com as medidas voltadas para desenvolver sistemas de transportes mais eficientes e sustentáveis no futuro, por exemplo no Capítulo 12 do Relatório *Energy Revolution* do Greenpeace (Greenpeace International *et al.*, 2015), no estudo desenvolvido pelo *The International Council on Clean Transportation* (ICCT) (Façanha *et al.*, 2012) e no estudo da EPE (2016a) sobre demanda de energia para 2050.

Assim, para o Cenário de Referência, considerou-se políticas com base em evolução tendencial do setor de transportes, como o incentivo aos biocombustíveis (escopo a ser abordado detalhadamente no Item 5). Para o Cenário 1,5°C, deu-se mais ênfase a tendências internacionais (p. ex. no modo rodoviário, em decorrência da origem estrangeira das grandes montadoras). Além disso, observa-se maior tendência para a eletromobilidade; um novo foco em biocombustíveis (aproveitando o potencial de produção e distribuição brasileiro), migrando do consumo de para outros setores como a indústria química. Sugere-se também maior investimento em biocombustíveis para os modos aquático (transporte doméstico) e aéreo (bio-óleo e bioquerosene).

3.2 Abordagem quantitativa

Dado que as projeções de consumo de energia e emissões de GEE variam em função das projeções do momento de transporte (em t.km ou pass.km), a abordagem quantitativa deste estudo baseou-se em projeções relacionadas ao PIB (produto interno bruto) para o transporte de carga e do PIB *per capita* para o transporte de passageiro (Façanha *et al.*, 2012; EPE, 2016a; Gonçalves e D’Agosto, 2017; Vanek *et al.*; 2014;).

Entende-se por momento de transporte um indicador de passageiro-quilômetro (pass.km) transportado, no caso do transporte de passageiro e tonelada-quilômetro (t.km) transportada, no caso do transporte de carga. Passageiro-quilômetro é uma unidade que apresenta o trabalho relativo ao

deslocamento de um passageiro a uma distância de um quilometro. Da mesma forma, tonelada-quilômetro é uma unidade que apresenta o trabalho relativo ao deslocamento de uma tonelada a uma distância de um quilometro (EPE, 2012).

Inicialmente, para o transporte de passageiro, seriam utilizadas projeções relacionadas ao crescimento da população. No entanto, a prática adotada na literatura especializada pesquisada e a análise de sensibilidade realizada apontaram a alternativa de estimar o momento de transporte para o transporte de passageiro por meio do PIB *per capita* (relação entre PIB e população). Dessa forma, optou-se por estimar o momento de transporte para o transporte de passageiro pelo PIB *per capita*, considerando que os deslocamentos de passageiros não estão relacionados apenas a quantidade de pessoas, mas também possuem relação com o poder aquisitivo delas.

Em função da disponibilidade de dados úteis e a menor complexidade em relação aos tipos de veículos, eficiências energéticas e curva de sucateamento, optou-se por utilizar a metodologia *top-down* de forma isolada para estimar o consumo de energia e emissão de GEE para os modos de transporte ferroviário, aquático, dutoviário e aéreo.

As abordagens, *top-down* e *bottom-up*, foram utilizadas de forma conjunta no caso do modo rodoviário. Os resultados da aplicação da metodologia *top-down* foram utilizados para ajustar a evolução do momento de transporte e do consumo de energia.

3.3. Método Top-Down

O procedimento metodológico *top-down* busca quantificar e identificar o consumo de energia e as emissões de GEE de forma agregada, permitindo apenas uma visão generalizada do uso de cada fonte. Assim, o cálculo das emissões é realizado como base em cinco conjuntos principais de dados para cada modo de transporte: (1) o momento de transporte; (2) divisão modal; (3) a eficiência energética; (4) divisão por tipo de combustível e (5) o fator de emissão para cada tipo de GEE e combustível.

Optou-se por adotar esta metodologia para os modos ferroviário, aquático, dutoviário e aéreo, para os transportes de carga e passageiro, por apresentarem menor diversidade de tipos de fontes de energia e dada a limitação de fontes de informação consistentes e confiáveis sobre sua intensidade de uso, frota circulante e rendimento energético. Neste caso, segue-se os procedimentos e as premissas do Estudo Associado ao Plano Decenal de Energia, PDE 2021, Consolidação de Bases de Dados do Setor

Transporte, 1970-2010 (EPE, 2012), em que o consumo de energia é levantado com base nos relatórios do Balanço Energético Nacional (EPE, 2016) publicado anualmente pelo Ministério de Minas e Energia e o momento de transporte obtido de diferentes fontes de informação e consolidado. Além disso, adotou-se esta metodologia também para o modo rodoviário, com o objetivo de calibrar os resultados alcançados pela aplicação da metodologia *bottom-up*.

O procedimento usado para estimar o consumo de energia e emissões de GEE por meio da metodologia *top-down* é sintetizado na Figura 1.

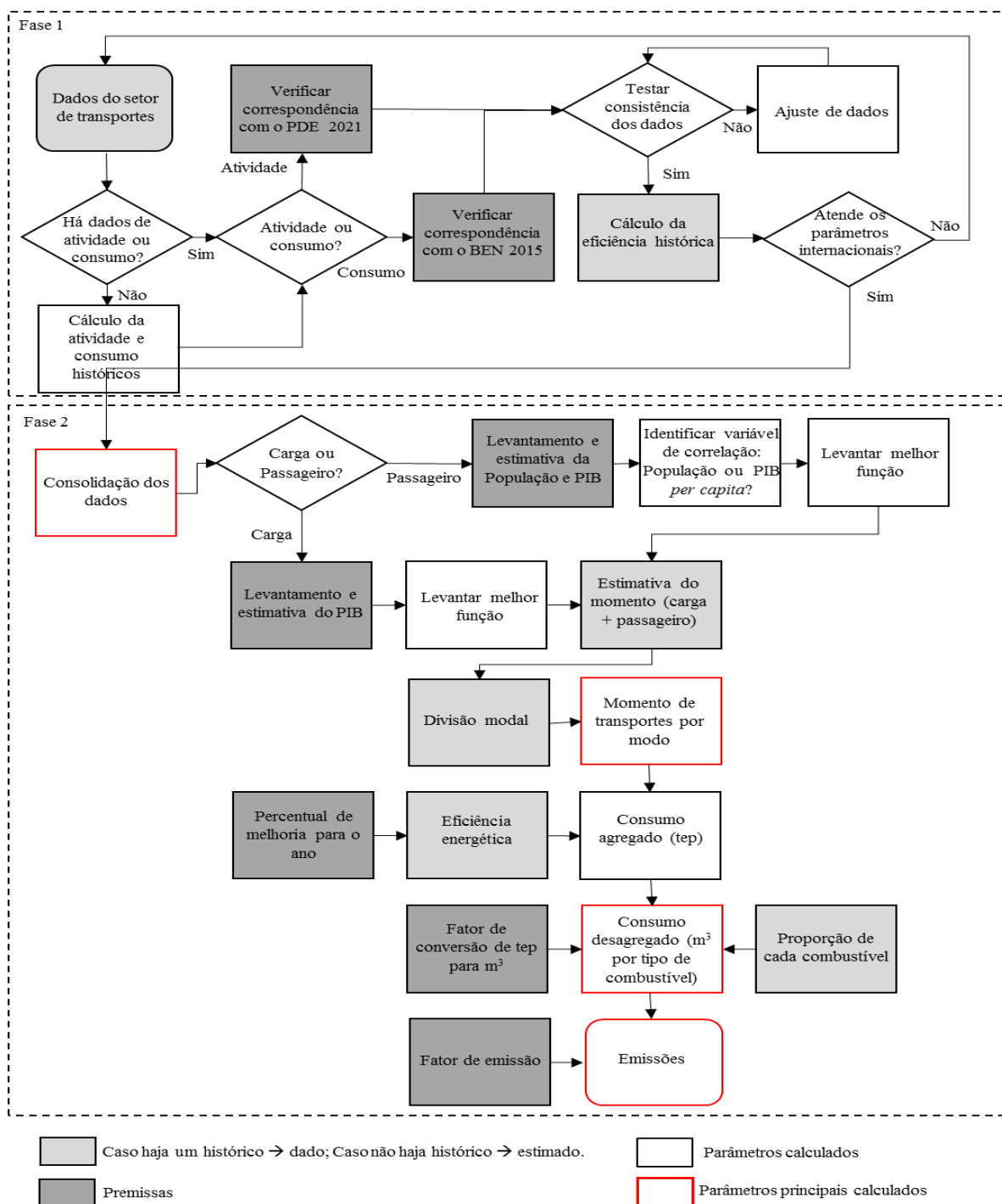


Figura 1. Procedimento adotada para estimar o consumo de energia e emissões de GEE por meio da metodologia *top-down*.

Fonte: Elaboração própria.

3.3.1. Coleta de dados

Inicialmente, os dados considerados como indispensáveis são levantados para aplicação da metodologia *top-down*. Portanto, consistem dos seguintes valores históricos por modo e tipo de atividade: (1) movimentação; (2) quilometragem percorrida; (3) percentual de quilometragem útil; (4) eficiência energética; (5) consumo energético por tipo de combustível e (6) perspectivas futuras de investimento, melhorias e entrada de novas tecnologias.

Após a obtenção dos dados em anuários do setor, inventários de emissão e/ou diretamente com as concessionárias, calcula-se o momento de transporte e seu respectivo consumo.

3.3.2. Análise de consistência dos dados

Nesta etapa, verifica-se se a atividade de transporte corresponde a apresentada no PDE 2021 e o respectivo consumo correspondem ao apresentado no Balanço Energético Nacional. Em casos que a diferença for superior a 5%, os valores são ajustados e, caso haja impossibilidade de ajuste, deve-se realizar uma nova coleta.

3.3.3. Cálculo da eficiência energética

Após a verificação e ajustes, calcula-se a eficiência energética por meio da Equação 1. Em seguida a mesma compara-a com as eficiências encontradas na literatura especializada, ou seja, realiza-se uma segunda verificação da confiabilidade dos dados históricos, uma vez que são os principais *inputs* do modelo.

$$Efe_{ma} = \frac{Ce_{ma}}{Mt_{ma}} \quad (1)$$

Em que,

Efe_{ma} : eficiência energética para o modo de transporte (m) e o ano (a);

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

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

Em casos onde a eficiência obtida não se enquadrava entre os valores mínimos e máximos levantados na literatura, uma nova coleta de dados foi realizada.

3.3.4. Consolidação dos dados

Após finalizar a Fase 1 para todos os modos e tipos de atividade, consolida-se os resultados por tipo de atividade (passageiro e carga) e, portanto, avalia-se a divisão modal ao longo dos anos (Equação 2).

$$P_{ma} = \frac{Mt_{ma}}{\sum Mt_{ma}} \quad (2)$$

Em que,

P_{ma} : participação percentual do modo de transporte (m) e o ano (a).

3.3.5. Levantamento e estimativas da População e PIB

Após o cálculo da divisão modal de passageiros e de carga, foram levantados os dados históricos de população e PIB, além das suas estimativas futuras fornecidas pelo modelo macroeconômico de equilíbrio geral, IMNACLIM-BR, utilizado neste estudo. Por fim, foi calculado o PIB *per capita* com base nas estimativas de população do IBGE.

Ajuste de curvas

O ajuste de curvas é realizado após a obtenção dos dados de PIB absoluto e *per capita*. Essa atividade tem como objetivo verificar a relação entre a atividade de transporte [t.km ou pass.km] e os dados de PIB, população e PIB *per capita*. Avalia-se a correlação pelo coeficiente ajustado (R^2).

Após identificar as variáveis independentes, realiza-se uma análise de sensibilidade para verificar a função que melhor se ajusta aos dados históricos. Para efeito da conjuntura dos dados nacionais no transporte de carga, recomenda-se a adoção de função exponencial, enquanto se recomenda a linear no transporte de passageiros.

Estimativa da divisão modal

Nesta etapa metodológica, levantam-se os planos governamentais a longo prazo com o propósito de identificar os investimentos em infraestrutura de transporte e seus respectivos impactos na divisão modal. Desta maneira, a projeção do momento de transporte para cada modo é estabelecida com base nos percentuais de divisão modal estimada.

Estimativa da eficiência energética

Conforme dados da eficiência histórica, tem-se base para identificar na literatura o percentual de melhoria anual. Nesse contexto, a projeção da eficiência energética é obtida por meio da Equação 3.

$$PEfe_{ma} = Efe_{ma-1} + tx_{pea} \quad (3)$$

Em que,

$PEfe_{ma}$: projeção da eficiência energética, expressa de acordo com o modo de transporte (m) e o ano da projeção (a);

$Efe_{m\ a-1}$: eficiência energética do modo de transporte (m) no ano anterior ao da projeção (a-1);

tx_{pea} : taxa de melhoria anual da eficiência energética prevista para o ano a.

Caso não seja viável identificar a taxa de melhoria de energética anual (p. ex. identificando apenas a melhoria acumulada de longo prazo), utiliza-se a Equação 4 para identificar a taxa de melhoria de eficiência energética anual.

$$tx_{pe} = \frac{(PEfe_{mf} - Efe_{mab})}{Qt_a} \quad (4)$$

Em que,

tx_{pe} : taxa de melhoria anual da eficiência energética;

$PEfe_{mf}$: previsão de melhoria agregada da eficiência energética para o modo de transporte (m) no ano final;

Efe_{mab} : eficiência energética para o modo de transporte (m) no ano de base;

Qt_a : quantidade de anos entre o ano base e o final.

Após a projeção da eficiência energética, verifica-se a consistência dos valores levantados com cenários semelhantes da literatura.

Cálculo do consumo de combustível

Para o cálculo do consumo de energia (combustível), foi utilizado como base o momento de transporte em conjunto com a eficiência energética de cada modo de transporte. Os consumos de energia para os anos passados foram levantados na Fase 1 e utilizados para aperfeiçoar o modelo proposto. Para os anos posteriores, o cálculo foi realizado com base na Equação 5.

$$Ce_{ma} = \frac{Mt_{ma} \times Efe_{ma}}{fc} \quad (5)$$

Em que,

Ce_{ma} : consumo de energia (em 10^3 tep), expressa de acordo com o modo de transporte (m) e o ano (a);

Mt_{ma} : momento de transporte relativo ao modo de transporte (m) e o ano (a);

Efe_{ma} : eficiência energética do modo de transporte (m) e do ano (a);

fc : é o fator de conversão de kJ para tep.

Após o cálculo do consumo de energia, faz-se a divisão pelas diferentes fontes de energia utilizadas (tipos de combustíveis), consoante às premissas levantadas na literatura. Posteriormente, realiza-se o cálculo do consumo de combustível, em medida de energia (Joules) e em medidas de volume (m^3), utilizando os fatores de conversão.

Procedimento para o cálculo das emissões

Neste estudo, considerou-se, além do CO_2 , os gases CH_4 , e N_2O . Assim, os fatores de emissão são calculados com base nos fatores de emissão da Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (MCTI, 2016). Para o cálculo das emissões de GEE (equação 6), multiplica-se o consumo de cada combustível pelo fator de emissão de cada GEE, apresentado na Tabela 2.

$$E_{mg}^A = \sum_k Vol_{A,k,m} * Fe_{gk} \quad (6)$$

Em que,

E_{mg}^A é a emissão anual em kg para o modo m do GEE g;

$Vol_{A,k,m}$: volume anual do combustível (k) calculado para modo (m); e

Fe_{gk} : fator de emissão do GEE g, expresso em kg/l, variando de acordo com o combustível k.

Tabela 2. Fator de emissão de GEE por tipo de combustível (kg/l e kg/TJ)

Modo	Combustível	Poluente	Fator	Unidade
Aquático, Aéreo e Ferroviário	Gasolina A	CO ₂	2,21	kg/l ¹ e kg/m ³ para o GNV
	Etanol Anidro		1,46	
	Etanol Hidratado		1,53	
	Biodiesel		2,43	
	GNV		2,05	
	Diesel Mineral		2,60	
	Óleo combustível		3,10	
	Diesel marítimo		3,10	
	Querosene de aviação		2,49	
	Gasolina de aviação		2,23	
Aquático	Diesel	CH ₄	7,00	kg/TJ
		N ₂ O	2,00	
	Óleo combustível	CH ₄	7,00	
		N ₂ O	2,00	
Aéreo	Gasolina de Aviação	CH ₄	0,50	
		N ₂ O	2,00	
	Querosene	CH ₄	0,50	
		N ₂ O	2,00	
Ferroviário	Diesel	CH ₄	4,15	
		N ₂ O	28,60	

Fonte: Elaborado própria, com base em MMA (2013) e MCTI (2016).

3.4. Método *Bottom-up*

O procedimento metodológico *bottom-up* tem por característica quantificar e identificar o consumo energético de forma desagregada, permitindo assim a gestão individualizada de cada fonte de energia. Portanto, para o cálculo do consumo de energia e das emissões de GEE, faz-se necessária a identificação de quatro principais conjuntos de dados: (1) frota circulante considerando ano, modelo, idade e fonte de energia para cada tipo de veículo; (2) intensidade de uso por tipo de veículo; (3)

consumo por tipo de fonte de energia e (4) fator de emissão de cada GEE para cada combustível utilizado.

Optou-se por adotar esta metodologia para o modo rodoviário, seguindo os procedimentos e as premissas adotados no Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, 2013 (MMA, 2013) para calcular a frota circulante, intensidade de uso, consumo de combustível e emissões de CO₂. O momento de transporte foi calibrado de acordo com o Estudo Associado ao Plano Decenal de Energia, PDE 2021, Consolidação de Bases de Dados do Setor Transporte, 1970-2010 (EPE, 2014) para anos anteriores a 2011. Para os anos de 2011 a 2050, os resultados foram comparados com os resultados obtidos por meio da metodologia *top-down*.

O transporte rodoviário possui maior diversidade de veículos, fontes de energia e complexidade operacional, o que leva a necessidade de maior detalhamento para quantificação do consumo de energia e emissões de GEE. No caso do modo rodoviário de passageiros, verifica-se uma “subdivisão” composta pelos automóveis, comerciais leves, motocicletas e veículos de transporte público. Muitos destes ainda usam uma diversidade de fontes energéticas, como é o caso dos automóveis em que se pode escolher entre gasolina, etanol, energia elétrica e/ou GNV. Os veículos de transporte público seguem a seguinte divisão: ônibus urbanos, micro-ônibus e ônibus rodoviários.

No caso do transporte de cargas, há também uma divisão de tipos de veículos conforme sua capacidade em: comerciais leves (ciclo Diesel), caminhões semileves, leves, médios, semipesados e pesados. Tanto para passageiros como para carga, os veículos de grande porte são movidos a diesel B8, mistura que contém 8% em volume de biodiesel e 92% em volume de óleo diesel de petróleo. Para o caso do transporte rodoviário, a quantificação da energia consumida e emissões de GEE é uma atividade intensiva em dados e, em uma situação ideal, os dados da frota, intensidade de uso e fatores de emissão deveriam ser observados/medidos em campo, porém, a experiência mencionada pela equipe que elaborou o Segundo Inventário Nacional de Emissões de Veículos Automotores 2013 (MMA, 2013) mostra que esta situação ideal é impraticável, em função das limitações de recursos materiais, humanos e tempo, sendo usual e aceitável que se estimem estes dados por meio de algum procedimento. O procedimento usado para estimar o consumo de energia e emissões de GEE que utiliza a abordagem está sintetizado na Figura 2.

Assim, de posse dos valores de energia consumida por tipo de combustível (em volume), procede-se o cálculo das emissões de GEE ao multiplicar a quantidade de cada combustível pelo fator de emissão referente a cada fonte de energia utilizada.

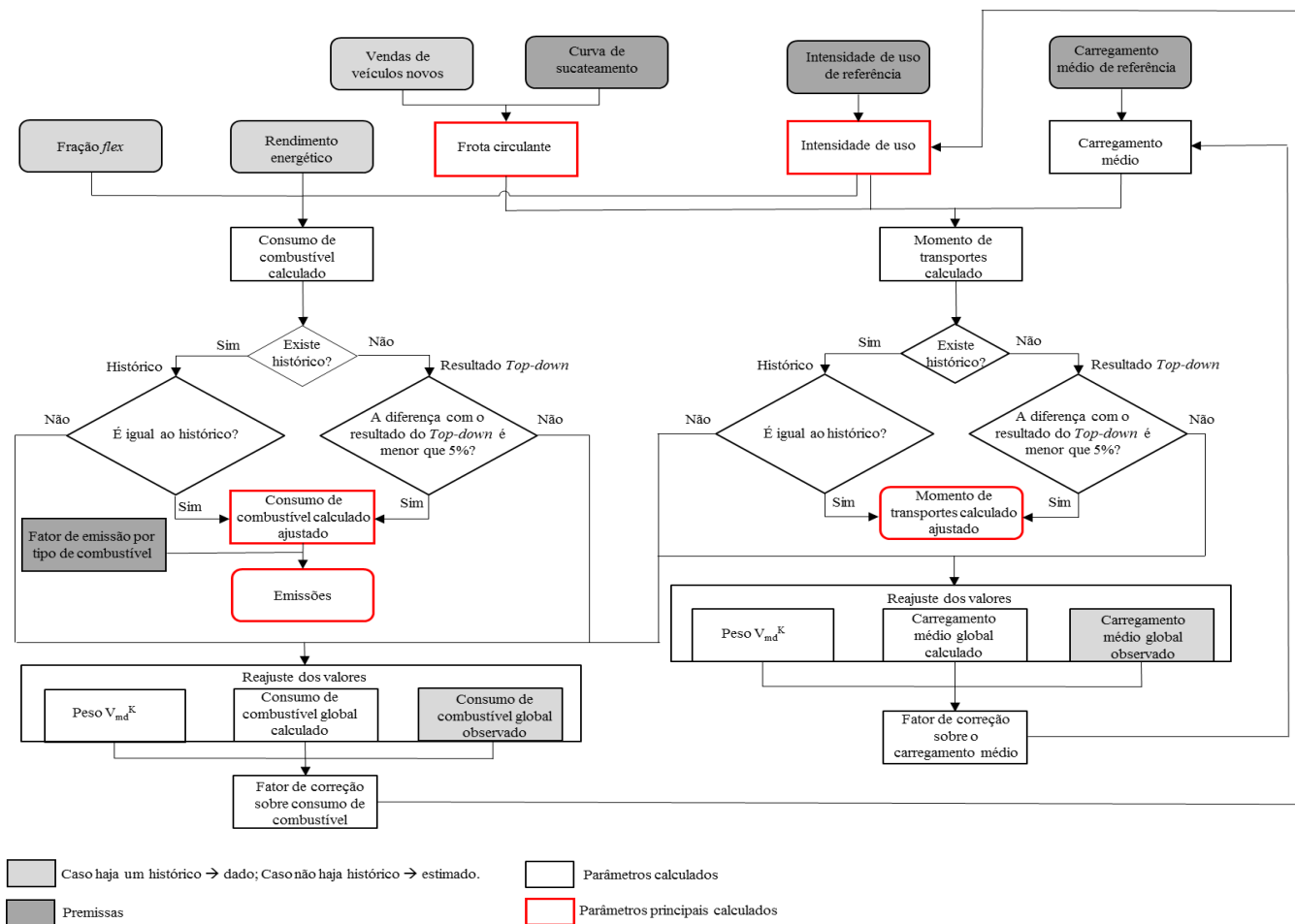


Figura 2. Procedimento adotado para estimar o consumo de energia e emissões de CO₂ por meio da metodologia *bottom-up*.

Fonte: Elaboração própria

3.4.1. Procedimento para cálculo da frota circulante

O cálculo da frota circulante se baseia na estimativa das vendas e das curvas de sucateamento para os diferentes tipos de veículos. Para o histórico de venda de veículos novos comercializados até o primeiro semestre de 2016, este estudo considera as instituições: Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA, 2016); Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares (ABRACICLO, 2016) (motocicletas) e o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), Vaz et al.; (2015) (automóveis híbridos e elétricos).

A estimativa de vendas futuras se baseia no histórico de vendas dos veículos novos, na estimativa do PIB e em estudos do setor. A curva de sucateamento foi obtida a partir do Relatório de Referência de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Setor Energético por Fontes Móveis, do Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (MCT 2010) e do Estudo da Frota Circulante Brasileira, SINDIPEÇAS (2009), conforme a Equação 7.

$$Fr_{a,V_{md},k} = V_{md} \times (1 - S_{a,V_{md},k}) \quad (7)$$

Em que,

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

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

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

Sendo o $S_{a,V_{md},k}$:

$S_{a,V_{md},k} = \exp(-\exp(\alpha + \beta(a)))$, para automóveis e veículos comerciais leves do Ciclo Otto;

$S_{A,V_{md},k} = \frac{1}{(1 + \exp(\alpha(a - a_0)))} + \frac{1}{(1 + \exp(\alpha(a + a_0)))}$, para comerciais leves do ciclo diesel, ônibus e caminhões;

Em que,

α : idade do veículo em anos;

$\alpha = 1,798$ para automóveis; $\alpha = 0,17$ para veículos comerciais leves do ciclo Diesel; $\alpha = 1,618$ para os demais veículos comerciais leves; $\alpha = 0,10$ para caminhões, $\alpha = 0,16$ para ônibus;

$\beta = -0,137$ para automóveis; $\beta = -0,141$ para veículos comerciais leves (exceto os do ciclo Diesel);
e

$\alpha_0 = 15,3$ para veículos comerciais leves do ciclo Diesel, $\alpha_0 = 17$ para caminhões e $\alpha_0 = 19,1$ para ônibus.

As curvas adotadas para os automóveis e comerciais leves (exceto os do ciclo Diesel) são as utilizadas pelo Serviço de Planejamento da PETROBRAS, calibradas pelos dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) (MME, 2013, *apud* PNAD, 1988). A função de sucateamento resultante é uma função *Gompertz* (MMA, 2013). Para os veículos do tipo comercial leve do ciclo Diesel, ônibus e caminhões, as curvas de sucateamento (função Logística) são calibradas a partir de dados de idade média e de frota total de 1997 fornecidos pelo DENATRAN (MMA, 2013).

Para motocicletas, adota-se a curva de sucateamento utilizada pelo SINDIPEÇAS (2009), no Estudo da Frota Circulante Brasileira, no primeiro e no segundo Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (MMA, 2011 e MMA, 2013), cujas taxas anuais de sucateamento para motocicletas de até 200cc são: 4% nos primeiros cinco anos; 5% do 6º ao 10º ano; 6% do 11º ao 15º ano e 8% do 16º ano em diante.

3.4.2. Procedimento para cálculo da intensidade de uso

Para o cálculo da intensidade de uso, considera-se primeiramente uma intensidade de uso de referência que foi baseada no Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, 2013 MMA (2013). Caso o consumo de combustível calculado por meio da intensidade de uso estimada não esteja de acordo com o observado por meio do histórico (até o ano base) ou o estimado por meio da metodologia top-down, a intensidade de uso deverá ser calibrada. Um coeficiente de ajuste da intensidade de uso para cada combustível k será calculado conforme Equação 8. Após esse procedimento, obtém-se a intensidade de uso ajustada por meio da Equação 10.

$$\alpha_{k,A} = \frac{Vol_{k,a}^{observado}}{Vol_{k,a}^{calculado}} \quad (10)$$

Em que,

$\alpha_{k,A}$: coeficiente de ajuste da intensidade de uso;

$Vol_{k,a}^{observado}$: consumo do combustível k observado no EPE (2016) para as séries históricas do ano A.

Já para as estimativas, o consumo do combustível k observado na estimativa *top-down* para o ano a;

$Vol_{k,a}^{calculado}$: consumo do combustível k calculado para o ano A.

Logo:

$$Iu'_{a,V_{md},k} = Iu_{a,V_{md},k} \times (\alpha_{k,a} \pm p_{md}^k) \quad (11)$$

Em que,

$Iu'_{a,V_{md},k}$: intensidade de uso ajustada no ano (a) para o veículo (V_{md}) que usa o combustível (k);

$Iu_{a,V_{md},k}$: intensidade de uso de referência no ano (a) para o veículo (V_{md}) que usa o combustível (k);

p_{md}^k : peso determinado para o veículo (V_{md}) que usa o combustível (k^1).

Caso o momento de transporte não esteja de acordo com o observado por meio do histórico (até o ano base) ou o estimado por meio da metodologia *top-down*, a intensidade de uso deverá ser

¹ O peso deverá ser determinado com base nas características dos veículos e da operação atual e tendencial dos mesmos. A partir da definição de tais características, realiza-se testes com a finalidade de verificar o peso adequado para cada tipo de veículo, de forma a calibrar o modelo.

calibrada novamente, porém sem que o consumo ultrapasse a diferença de 5% do observado/estimado.

3.4.3. Procedimento para cálculo do consumo de combustível

O consumo de combustível é calculado com base no rendimento energético, na frota circulante, na intensidade de uso e na fração *flex* (percentual de veículos *flexible-fuel*) que utiliza cada tipo de combustível (gasolina e etanol).

Para o cálculo do consumo de combustível proveniente dos veículos automotores, utilizou-se a Equação 12.

$$Vol_{k,A}^{calculado} = \sum_{V_{md}} Fr_{A,V_{md},k} \cdot \frac{Iu_{A,V_{md},k}}{Ren_{A,V_{md},k}} \quad (12)$$

Em que,

$Ren_{A,V_{md},k}$ é o rendimento dos veículos (V_{md}) no ano (a) que usam o combustível (k);

$Vol_{A,k}$ é o volume combustível (k) calculado para o ano (a).

Após realizar o ajuste da intensidade de uso, conforme a Equação 11, tem-se a expressão para determinar o volume consumido na Equação 13.

$$Vol'_{k,a} = \sum_{V_{md,a}} Fr_{a,V_{md},k} \cdot \frac{Iu'_{a,V_{md},k}}{Ren_{a,V_{md},k}} \quad (13)$$

Em que,

$Vol'_{a,k}$ é o volume combustível (k) calculado e calibrado para o ano (a).

3.4.4. Procedimento para estimativa do momento de transporte

Tendo sido definida e ajustada a intensidade de uso, determina-se o momento de transporte para o transporte de carga (t.km) e passageiro (pass.km), por meio das equações 14 e 15, respectivamente.

$$M_{calculado}^{a,carga} = \sum_{cam_{tp}} Fr_{a,cam_{tp},k} \cdot Iu'_{a,cam_{tp},k} \cdot Carreg_{a,cam_{tp}}^{médio} \quad (15)$$

$$M_{calculado}^{a,passageiro} = \sum_{Vp_l} Fr_{a,Vp_l,k} \cdot Iu'_{a,Vp_l,k} \cdot Carreg_{a,Vp_l}^{médio} \quad (16)$$

Em que,

cam_{tp} : comerciais leves, caminhões semileves, leves, médios, semipesados e pesados; e
 Vp_l : veículos para transportes de passageiros (automóveis, comerciais leves, motocicletas e ônibus).

Para que o momento de transporte de carga calculado seja igual ao estimado com base no PIB Absoluto e o momento de transporte de passageiro fosse igual ao estimado com base no PIB *per capita*, foram determinados os coeficientes $\beta_{carga,a}$ e $\beta_{passageiro,a}$ definidos nas Equações 17 e 18 que serão utilizados para corrigir o carregamento médio utilizado nos cálculos.

Para o caso de o momento de transporte de carga calculado ser maior do que o observado (de 1980 a 2010 publicado no PDE 2021) ou estimado pela metodologia *top-down* (de 2016 até 2050), a correção é feita ao ajustar a taxa de lotação dos caminhões e comerciais leves, de preferência dos de menor capacidade para os de maior capacidade, de modo que o momento calculado seja igual ao observado. No caso de o valor calculado ser menor do que o momento de transporte observado ou estimado, a correção é feita ao ajustar a taxa de lotação dos veículos de maior capacidade para os de menor capacidade, de modo que o momento calculado seja igual ao observado.

Ademais, no caso de o momento de transporte de passageiros calculado ser maior do que o observado (de 1980 a 2010 publicado no PDE 2021) ou estimado pela metodologia *top-down* (de 2016 até 2050), a correção é realizada ao ajustar a taxa de ocupação dos ônibus (urbanos, rodoviários e micro) de modo que o momento calculado seja igual ao observado ou estimado. No caso de a estimativa ser menor do que o momento de transporte observado ou estimado, a correção é realizada ao ajustar a taxa de ocupação dos ônibus (urbanos, rodoviários e micro) e dos automóveis de modo que o momento calculado seja igual ao observado ou estimado. Para ambos os casos (carga e passageiros), além do ajuste na lotação média, pode ser necessário o ajuste na intensidade de uso, considerando a calibração do consumo.

$$\beta_{carga,a} = \frac{Momento_{a,carga}^{observado}}{Momento_{a,carga}^{calculado}} = \frac{Carreg_{a,cam_{t,a}}^{estimado,carga}}{Carreg_{a,cam_{t,a}}^{médio,carga}} \quad (17)$$

$$\beta_{passageiros,a} = \frac{Momento_{a,passageiro}^{observado}}{Momento_{a,passageiro}^{calculado}} = \frac{Carreg_{a,v_{p,a}}^{estimado,passageiro}}{Carreg_{a,v_{p,a}}^{médio,passageiro}} \quad (18)$$

Os carregamentos estimados dos veículos são definidos de acordo com o comportamento do histórico observado até 2010. Sendo assim, o valor futuro do momento de transporte é determinado pelas Equações 19 e 20.

$$Momento_{calculado}^{A,carga} = \sum_{cam_{tp}} Fr_{a,cam_{tp},k} \cdot Iu'_{a,cam_{tp},k} \cdot Carreg_{a,cam_{tp}}^{médio} \cdot (\beta_{carga,a} \pm p_{md^k}) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} Momento_{calculado}^{A,passageiro} \\ = \sum_{vp_l} Fr_{a,v_{p_l},k} \cdot Iu'_{a,v_{p_l},k} \cdot Carreg_{a,v_{p_l}}^{estimado,passageiro} \cdot (\beta_{passageiros,a} \pm p_{md^k}) \end{aligned} \quad (20)$$

3.4.5. Procedimento para cálculo da emissão de GEE

Neste estudo, foram considerados, além do CO₂, os gases CH₄ e N₂O. Os fatores de emissão do modo rodoviário são obtidos do Relatório da Qualidade do Ar no Estado de São Paulo (CETESB, 2015) e MMA (2013), em que são apresentados por tipo de veículo, ano-modelo e combustível.

O último Relatório da Qualidade do Ar no Estado de São Paulo (CETESB, 2015) apresenta os fatores de emissão até 2014. Para o cálculo das emissões de 2015 a 2050, reproduz-se como constante o fator de emissão de 2014. Também não são apresentados valores para veículos híbridos, considerando para o cálculo os mesmos valores dos veículos flex.

Para o cálculo das emissões de CO₂, multiplica-se o consumo de cada combustível de cada veículo pelo fator de emissão de cada ano, conforme Equação 21.

$$E_{vCO_2}^a = \sum_k Vol_{a,k,v} * Fe_{CO_2kva} \quad (21)$$

Em que,

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

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

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

Nas Tabelas 3 a 15, tem-se os fatores de emissão do CH₄ e N₂O dentro de cada categoria de veículo e cada tipo de combustível.

Tabela 3. Fatores de emissão de CH₄ por categoria e por combustível para automóveis e veículos leves (g/km).

Ano/modelo	Combustível	Fator de emissão (g/km)
até 1983	Gasolina C	0,45
	Etanol hidratado	0,24
1984-1985	Gasolina C	0,36
	Etanol hidratado	0,24
1986-1987	Gasolina C	0,30
	Etanol hidratado	0,24
1988	Gasolina C	0,26
	Etanol hidratado	0,26
1989	Gasolina C	0,24
	Etanol hidratado	0,24
1990	Gasolina C	0,21

Ano/modelo	Combustível	Fator de emissão (g/km)
1991	Etanol hidratado	0,20
	Gasolina C	0,20
	Etanol hidratado	0,17
1992	Gasolina C	0,09
	Etanol hidratado	0,09
1993	Gasolina C	0,09
	Etanol hidratado	0,11
1994	Gasolina C	0,15
	Etanol hidratado	0,19
1995	Gasolina C	0,15
	Etanol hidratado	0,19
1996	Gasolina C	0,10
	Etanol hidratado	0,16
1997	Gasolina C	0,05
	Etanol hidratado	0,08
1998	Gasolina C	0,03
	Etanol hidratado	0,05
1999	Gasolina C	0,03
	Etanol hidratado	0,05
2000	Gasolina C	0,03
	Etanol hidratado	0,05
2001	Gasolina C	0,03
	Etanol hidratado	0,04
2002	Gasolina C	0,03
	Etanol hidratado	0,04
2003	Gasolina C	0,03
	Etanol hidratado	0,04
	Flex - Gasolina C	0,01
	Flex - Etanol hidratado	0,04
2004	Gasolina C	0,03
	Etanol hidratado	0,05
	Flex - Gasolina C	0,02
	Flex - Etanol hidratado	0,04
2005	Gasolina C	0,02
	Etanol hidratado	0,05
	Flex - Gasolina C	0,03
	Flex - Etanol hidratado	0,04
2006	Gasolina C	0,02
	Etanol hidratado	0,03
	Flex - Gasolina C	0,02
	Flex - Etanol hidratado	0,03
2007	Gasolina C	0,02
	Flex - Gasolina C	0,02
	Flex - Etanol hidratado	0,03
2008	Gasolina C	0,01
	Flex - Gasolina C	0,02
	Flex - Etanol hidratado	0,01
2009	Gasolina C	0,007
	Flex - Gasolina C	0,006
	Flex - Etanol hidratado	0,026
2010	Gasolina C	0,007
	Flex - Gasolina C	0,009
	Flex - Etanol hidratado	0,05
2011	Gasolina C	0,013
	Flex - Gasolina C	0,008

Ano/modelo	Combustível	Fator de emissão (g/km)
2012	Flex - Etanol hidratado	0,042
	Gasolina C	0,026
	Flex - Gasolina C	0,014
	Flex - Etanol hidratado	0,028

Tabela 4. Fatores de emissão de CH₄ para motores diesel (g/km)

Categoria	CH ₄ (g/km)
Comerciais leves	0,005
Ônibus	0,060
Caminhões	0,060

Tabela 5. Fatores de emissão de N₂O por categoria para veículos do ciclo Diesel (g/km).

Categoria	N ₂ O (g/km)
Comerciais leves	0,02
Ônibus	0,03
Caminhões	0,03

Tabela 6. Fatores de emissão de N₂O e CH₄ para veículos movidos a GNV (g/km).

CH ₄	N ₂ O (g/km)
0,22	0,0313

Tabela 7. Fatores de emissão de CH₄ para motocicletas (g/km).

Ano/modelo	Combustível	CH ₄ (g/km)
Até 2002	Gasolina C	0,39
2003	Gasolina C	0,12
2004	Gasolina C	0,13
2005	Gasolina C	0,07
2006	Gasolina C	0,05
2007	Gasolina C	0,05
2008	Gasolina C	0,04
2009	Gasolina C	0,02
	Flex - Gasolina C	0,02
	Flex - Etanol hidratado	0,02
2010	Gasolina C	0,02
	Flex - Gasolina C	0,02
	Flex - Etanol hidratado	0,02
2011	Gasolina C	0,03
	Flex - Gasolina C	0,02
	Flex - Etanol hidratado	0,02
2012	Gasolina C	0,03
	Flex - Gasolina C	0,02
	Flex - Etanol hidratado	0,02

Tabela 8. Fatores de emissão variáveis de automóveis nos anos (g/km) – gasolina C.

Gás/Ano	Até 1983	1984-1985	1986-1987	1988	1989	1990	1991
CH ₄	0,45	0,36	0,3	0,255	0,240	0,21	0,195
N ₂ O	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Gás/Ano	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
CH ₄	0,09	0,09	0,149	0,149	0,1	0,05	0,035
N ₂ O	0,004	0,004	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022
Gás/Ano	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
CH ₄	0,035	0,032	0,027	0,027	0,027	0,027	0,025
N ₂ O	0,022	0,022	0,022	0,022	0,021	0,021	0,021
Gás/Ano	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
CH ₄	0,017	0,017	0,014	0,08	0,07	0,013	0,026
N ₂ O	0,021	0,021	0,024	0,024	0,023	0,021	0,021
Gás/Ano	2013			2014-2050			
CH ₄	0,006			0,006			
N ₂ O	0,022			0,021			

Fonte: Elaboração própria com base em CETESB (2015)

Tabela 9. Fatores de emissão variáveis de automóveis nos anos (g/km) – álcool hidratado

Gás/Ano	Até 1983	1984-1985	1986-1987	1988	1989	1990	1991
CH ₄	0,24	0,24	0,24	0,255	0,24	0,195	0,165
N ₂ O	0,007	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
Gás/Ano	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
CH ₄	0,09	0,105	0,186	0,186	0,16	0,08	0,051
N ₂ O	0,006	0,006	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
Gás/Ano	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
CH ₄	0,045	0,048	0,040	0,043	0,043	0,045	0,045
N ₂ O	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
Gás/Ano	2006						
CH ₄	0,032						
N ₂ O	0,017						

Fonte: Elaboração própria com base em CETESB (2015)

Tabela 10. Fatores de emissão variáveis de automóveis nos anos (g/km) – flex e híbrido – gasolina C.

Gás/Ano	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
CH ₄	0,012	0,02	0,027	0,028	0,028	0,024	0,003
N ₂ O	0,023	0,022	0,021	0,02	0,021	0,021	0,019
Gás/Ano	2010	2011	2012	2013	2014-2050		
CH ₄	0,009	0,008	0,014	0,006	0,004		
N ₂ O	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019		

Fonte: Elaboração própria com base em CETESB (2015)

Tabela 11. Fatores de emissão variáveis de automóveis nos anos (g/km) – flex e híbrido – álcool hidratado.

Gás/Ano	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
CH ₄	0,04	0,037	0,037	0,034	0,034	0,031	0,039
N ₂ O	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
Gás/Ano	2010	2011	2012	2013	2014-2050		
CH ₄	0,05	0,042	0,028	0,032	0,02		
N ₂ O	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017		

Fonte: Elaboração própria com base em CETESB (2015)

Tabela 12. Fatores de emissão variáveis de comerciais leves nos anos (g/km) – gasolina C.

Gás/Ano	Até 1983	1984	1985	1986-1992	1993	1994	1995
CH ₄	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
N ₂ O	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004	0,022	0,022
Gás/Ano	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
CH ₄	0,25	0,181	0,03	0,026	0,024	0,031	0,028
N ₂ O	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022
Gás/Ano	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
CH ₄	0,028	0,03	0,003	0,012	0,013	0,057	0,001
N ₂ O	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,024	0,028
Gás/Ano	2010	2011	2012	2013	2014-2050		
CH ₄	0,007	0,008	0,006	0,004	0,002		
N ₂ O	0,027	0,024	0,024	0,025	0,022		

Fonte: Elaboração própria com base em CETESB (2015)

Tabela 13. Fatores de emissão variáveis de comerciais leves nos anos (g/km) – álcool hidratado.

Gás/Ano	Até 1984	1985-1990	1991	1992	1993	1994	1995
CH ₄	0,165	0,165	0,165	0,165	0,165	0,165	0,165
N ₂ O	0,007	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,017
Gás/Ano	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
CH ₄	0,165	0,173	0,155	0,156	0,156	0,156	0,059
N ₂ O	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
Gás/Ano	2003	2004	2005				
CH ₄	0,059	0,059	0,037				
N ₂ O	0,017	0,017	0,017				

Fonte: Elaboração própria com base em CETESB (2015)

Tabela 14. Fatores de emissão variáveis de comerciais leves nos anos (g/km) – flex e híbrido – gasolina C.

Gás/Ano	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
CH ₄	0,024	0,024	0,024	0,024	0,045	0,05	0,024
N ₂ O	0,023	0,022	0,021	0,020	0,020	0,020	0,028
Gás/Ano	2010	2011	2012	2013	2014-2050		
CH ₄	0,029	0,012	0,009	0,009	0,006		
N ₂ O	0,024	0,026	0,026	0,027	0,027		

Fonte: Elaboração própria com base em CETESB (2015)

Tabela 15. Fatores de emissão variáveis de comerciais leves nos anos (g/km) – flex e híbrido – álcool hidratado.

Gás/Ano	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
CH ₄	0,035	0,035	0,035	0,035	0,056	0,056	0,008
N ₂ O	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
Gás/Ano	2010	2011	2012	2013	2014-2050		
CH ₄	0,073	0,048	0,049	0,038	0,021		
N ₂ O	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017		

Fonte: Elaboração própria com base em CETESB (2015)

Para o cálculo das emissões de CH₄ e N₂O, utilizou-se a Equação 22, onde multiplica-se a quilometragem média percorrida de cada veículo e tipo de combustível, pelo seu respectivo fator de emissão, apresentado nas tabelas anteriores, conforme Equação 8.

$$E_{mg}^a = \sum (\overline{Km}_{v,a,k} * Fe_{gvak}) \quad (22)$$

Em que,

E_{mg}^a é a emissão anual em g para o veículo (v), ano (a) e combustível (k), do GEE (g);

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

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

3.4.6. Procedimento para veículos convertidos para uso de GNV

A metodologia para estimar as emissões de CO₂ por veículos convertidos para o uso de GNV é a mesma adotada nos dois últimos Inventários Nacionais de Emissões de Veículos Automotores (MMA, 2011 e MMA, 2013) por meio de metodologia *top down*, onde os fatores de emissão em g_{poluente}/m³_{combustível} são aplicados diretamente ao consumo de combustível relatado no Balanço Energético Nacional (EPE, 2016).

Para conversão dos fatores de emissão em g/km para g/m³, foi adotado o valor médio de rendimento igual a 12 km/m³, também utilizados em MMA (2011) e (2013). No que se refere às emissões de CO₂, os procedimentos e valores adotados são os mesmos apresentados na Seção 3.3.5.5 deste estudo.

Os veículos considerados como convertidos para GNV foram retirados da frota que pertenciam originalmente e passaram a ser considerados como frota GNV, com o intuito de evitar a dupla contagem.

4. Premissas gerais

Neste item serão apresentadas as premissas gerais que servirão de base para ambos os cenários.

4.4.1. Transporte de Passageiros

Neste item serão apresentadas as premissas relacionadas ao transporte de passageiros que servirão de base para ambos os cenários.

Frota

A determinação da divisão da frota de veículos rodoviários de passageiros foi baseada em informações do histórico de vendas, fornecido por meio de relatórios da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA, 2017), no período de 1957 a 2016 e na Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares (ABRACICLO, 2017) para vendas de motocicletas em 2013 a 2016. A Tabela 16 apresenta a frota de veículos rodoviários no ano base.

Tabela 16. Tipos e percentuais de veículos rodoviários de passageiros, ano base 2016.

Tipo de Veículo	Percentual de participação
Automóvel a gasolina (dedicado)	30,63%
Automóvel a etanol (dedicado)	2,61%
Automóvel <i>flexible fuel</i>	65,39%
Automóvel a GNV	1,36%
Automóvel híbrido elétrico	0,01%
Automóvel elétrico <i>plug-in</i>	0,0001%
Motocicleta a gasolina (dedicado)	81,1%
Motocicleta <i>flexible fuel</i>	19,9%
Comercial leve a gasolina (dedicado) ¹	34,85%
Comercial leve a etanol (dedicado)	1,74%
Comercial leve <i>flexible fuel</i>	61,77%
Comercial leve GNV	1,63%
Ônibus urbano diesel	99,089%
Ônibus urbano híbrido diesel-elétrico	0,001%
Ônibus urbano elétrico <i>plug-in</i>	0,01%
Micro-ônibus diesel	99,99%
Micro-ônibus elétrico <i>plug-in</i>	0,01%
Ônibus rodoviário diesel	100%

Nota: (1) os veículos comerciais leves ciclo Diesel foram considerados apenas no transporte de carga.

Fonte: Elaboração própria

Intensidade de Uso

Para determinação da intensidade de uso de referência dos veículos rodoviários de passageiros que estarão em operação até o ano 2050 na forma da distância média anual percorrida pelos veículos (km/ano), conforme pode ser observado na Tabela 17, baseou-se em informações fornecidos pelo MMA (2013). Os ajustes necessários para determinação da intensidade de uso foram baseados no consumo de energia obtido pelo método *top-down*.

Tabela 17. Intensidade de uso de referência adotada por tipo de veículos de passageiro.

Tipo de Veículo	Intensidade de uso (km/ano)
Automóvel a gasolina (dedicado)	20.000
Automóvel a etanol (dedicado)	
Automóvel <i>flexible fuel</i>	
Automóvel a GNV	30.000
Automóvel híbrido <i>flex</i> -elétrico	20.000
Automóvel elétrico <i>plug-in</i>	
Motocicleta a gasolina (dedicado)	12.000
Motocicleta <i>flexible fuel</i>	
Comercial leve a gasolina (dedicado) ¹	20.000
Comercial leve a etanol (dedicado)	
Comercial leve <i>flexible fuel</i>	
Comercial leve GNV	30.000
Ônibus urbano diesel	91.994
Ônibus urbano híbrido diesel-elétrico	
Ônibus urbano elétrico <i>plug-in</i>	
Micro-ônibus diesel	
Micro-ônibus elétrico <i>plug-in</i>	
Ônibus rodoviário diesel	118.094

Nota: (1) os veículos comerciais leves ciclo Diesel foram considerados apenas no transporte de cargas; (2) variações da intensidade de uso com a idade do veículo seguem a mesma sistemática fornecida pelo Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013 (MMA, 2013). Fonte: Elaboração própria

Momento de Transporte

Adotou-se a lotação média dos ônibus rodoviários, ônibus urbanos e dos micro-ônibus para o valor de 45, 40 e 13 (passageiros) respectivamente, com base no momento de transporte histórico obtido no estudo da EPE (2012).

Para o ajuste do momento de transporte calculado, considerou-se o também o EPE (2012) para os dados históricos e o resultado obtido por meio do modelo *top-down* (projeção).

Rendimento

Para identificação do rendimento atual dos veículos rodoviários de passageiros baseou-se em informações fornecidas pelo Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013 (MMA, 2013) para os veículos híbridos, enquanto que o rendimento dos veículos elétricos foi baseado nos estudos elaborados pelas instituições: *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (Sims, R. *et al.*, 2014); *C40 Cities Climate Leader Group* e *Inter-American Development Bank* (IDB) (C40 e IDB, 2013) e por meio de manuais de veículos disponíveis atualmente, no mercado mundial (Nissan, 2011 e BYD, 2014).

Para determinação da melhoria da eficiência energética desses veículos, adotaram-se os valores com base nos estudos realizados pelo *The International Council on Clean Transportation* (ICCT) (Façanha *et al.*, 2012), *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (Sims, R *et al.*, 2014) e pelo *U.S. Department of Energy*, Vyas *et al.*, (2013), conforme Tabelas 18, 19 e 20.

Tabela 18. Rendimento e melhoria de eficiência energética dos veículos rodoviários de passageiro (ciclo Otto).

Veículo	Rendimento [km/l]	Melhoria de eficiência ⁽¹⁾
Automóvel a gasolina (dedicado)	11,3	Não será considerado
Automóvel a etanol (dedicado)	6,9	Não será considerado
Automóvel <i>flexible fuel</i> (gasolina)	12,2	25% até 2050
Automóvel <i>flexible fuel</i> (etanol)	8,5	25% até 2050
Motocicleta a gasolina (dedicado)	37,19	10% até 2050
Motocicleta <i>flexible fuel</i> (gasolina)	43,2	10% até 2050
Motocicleta <i>flexible fuel</i> (etanol)	29,30	10% até 2050
Comercial leve a gasolina (dedicado)	9,9	10% até 2050
Comercial leve a etanol (dedicado)	6,9	Não será considerado
Comercial leve <i>flexible fuel</i> (gasolina)	9,1	25% até 2050
Comercial leve <i>flexible fuel</i> (etanol)	6,2	25% até 2050
Ônibus urbano diesel (BX)	2,3	Redução de 25%, em função da conversão da frota para o tipo <i>Padron</i> e BRT, ambos com ar condicionado
Micro-ônibus diesel (BX)	6,9	5% até 2050
Ônibus rodoviário diesel (BX)	9,1	5% até 2050

Legenda: BX: Percentual de biodiesel adicionado ao diesel de petróleo, que atualmente é de 8%.
 Notas: (1) em relação a 2012.

Fonte: Elaboração própria

Tabela 19. Rendimento energético dos veículos rodoviários de passageiro (GNV).

Veículo	Rendimento [km/m ³]	Melhoria de eficiência
Automóvel a GNV	12	Não será considerado
Comercial leve a GNV	12	

Fonte: Elaboração própria

Tabela 20. Rendimento energético dos veículos rodoviários de passageiro (híbrido diesel-elétrico).

Veículo	Rendimento	Melhoria de eficiência
Automóvel híbrido <i>flex</i> -elétrico (etanol)	11,6 km/l	25% até 2050
Automóvel híbrido <i>flex</i> -elétrico (gasolina)	16,6 km/l	25% até 2050
Automóvel elétrico <i>plug-in</i>	3,5 km/kwh	25% até 2050
Ônibus urbano híbrido diesel-elétrico	2,3 km/l	15% até 2050
Ônibus urbano elétrico <i>plug-in</i>	1 km/kwh	15% até 2050

Fonte: Elaboração própria

Para comparar e ajustar a melhoria de eficiência global baseou-se na eficiência energética obtida a partir do 5º Relatório de Análise do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - Capítulo 8, elaborado pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (Sims, R *et al.*, 2014), também foram considerados os estudos realizados pelo *The International Council on Clean Transportation* (ICCT) (Façanha *et al.*, 2012) e *U.S. Department of Energy*, Vyas *et al.*, (2013), além da experiência dos pesquisadores.

Outros Modos

Para os demais modos de transporte de passageiros (aéreo, aquático e ferroviário), considerou-se eficiência energética atual (kJ/t.km) dos modos com base nas informações de momento de transporte e consumo de energia da evolução histórica dos modos fornecida pelo Estudo Associado ao Plano Decenal de Energia – PDE 2021: Consolidação de base de dados do setor de transportes 2012 (EPE, 2012), sendo o momento de transporte atualizado com estudos mais recentes. No caso do modo aéreo, os dados foram atualizados pelos anuários da ANAC, enquanto que no modo aquático, foram atualizados com base no estudo da ANTAQ (2013) e de dados obtidos pela CCR Barcas (2015), além disso, a demanda de energia foi atualizada de acordo com o Balanço Energético Nacional (EPE_b, 2016).

Para determinação da melhoria da eficiência energética dos veículos, optou-se por adotar um referencial teórico para balizar os valores que serão utilizados através do 5º Relatório de Análise do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas Capítulo 8, elaborado pelo *Intergovernmental*

Panel on Climate Change (IPCC), (Sims, R et al., 2014) e pelo U.S. Department of Energy, Vyas et al., (2013). Portanto, foram estabelecidos os valores de referência conforme o nível de eficiência energética estabelecida para cada modo, bem como o ano em que se atinge tal eficiência.

Tabela 21. Evolução do rendimento energético por modo de transporte, em kJ/pass.km.

Ano	Aéreo	Ferrovário	Rodoviário	Fluvial ¹
2010	1.264	219	1.073	2.196
2015	1.041	197	1.059	1.982

Nota:(1). Fluvial e marítimo.

4.1.2. Transporte de Carga

Neste item serão apresentadas as premissas relacionadas ao transporte de carga que servirão de base para ambos os cenários.

Modo Rodoviário

Neste item serão apresentadas as premissas relacionadas ao transporte de carga para o modo rodoviário.

Frota

A determinação da divisão da frota de veículos rodoviários de carga foi baseada em informações do histórico de vendas, fornecido por meio de relatórios da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA, 2016) no período de 1957 a 2015.

Intensidade de Uso

Para determinação da intensidade de uso de referência dos veículos rodoviários de carga que estarão em operação até o ano 2050, na forma da distância média anual percorrida pelos veículos (km/ano), baseou-se em informações fornecidos pelo MMA, (2013), conforme pode ser observado na Tabela 22. Os ajustes necessários para determinação da intensidade de uso foram baseados no consumo obtido pelo método *top-down*.

Tabela 22. Intensidade de uso de referência adotada por tipo de veículos de carga

Tipo de Veículo	Intensidade de uso no ano de aquisição do veículo (km/ano) ¹
Comercial leve diesel	20.000
Caminhão leve diesel	64.580
Caminhão semileve diesel	64.580
Caminhão médio diesel	112.310
Caminhão semipesado diesel	117.904
Caminhão pesado diesel	117.904

Nota: (1) variações da intensidade de uso com a idade do veículo seguem a mesma sistemática fornecidos pelo Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013 (MMA, 2013).

Fonte: Elaboração própria

Rendimento

A identificação do rendimento médio atual dos veículos rodoviários de passageiros se baseou nas informações fornecidas pelo MMA (2013). Para os veículos híbridos, baseou-se nos estudos elaborados por C40 Cities Climate Leader Group e Inter-American Development Bank (IDB), C40 e IDB, (2013). Para determinação da melhoria da eficiência energética desses veículos, adotaram-se os valores com base nos estudos realizados por Façanha *et al.* (2012), Sims *et al.* (2014) e Vyas *et al.* (2013), conforme Tabelas 23.

Tabela 23. Rendimento e melhoria de eficiência energética dos veículos rodoviários de carga (ciclo Diesel).

Veículo	Rendimento [km/l]	Melhoria de eficiência ⁽¹⁾
Comercial leve diesel (BX)	10,5	Sem alteração
Caminhão leve diesel (BX)	5,6	15% até 2050
Caminhão semileve diesel (BX)	9,1	
Caminhão médio diesel (BX)	5,6	
Caminhão semipesado diesel (BX)	3,4	
Caminhão pesado diesel (BX)	3,4	

Notas: (1) em relação a 2012; (2) os veículos comerciais leves ciclo Otto foram considerados apenas no transporte de passageiros.

Fonte: Elaboração própria

Com os resultados obtidos a partir da aplicação do procedimento para cálculo do consumo de combustível, identificou-se e ajustou-se a melhoria de eficiência alcançada e o consumo estimado.

O consumo de combustível calculado foi comparado e ajustado com o consumo obtido pelo método *top-down* (projeção para o rodoviário) e com os dados históricos, obtidos por meio do Inventário Nacional de Emissões de Veículos Automotores 2013 (MMA, 2013).

Momento de Transporte

Adotou-se de forma conservadora o carregamento médio de 50% da lotação dos caminhões, com base na experiência dos pesquisadores, inserindo como premissa que o retorno das viagens é feito com os veículos vazios. O momento de transportes calculado foi comparado e ajustado com o consumo obtido pelo método *top-down* (projeção para o rodoviário) e com os dados históricos, obtidos por meio do PDE 2021 (EPE, 2012).

Outros Modos

Para os demais modos de transporte de carga (dutoviário, aéreo e aquático), considerou-se o rendimento energético atual (kJ/t.km) dos modos com base nas informações de momento de transporte e consumo de energia por meio de informações relacionadas a evolução histórica dos modos fornecida pelo Estudo Associado ao Plano Decenal de Energia – PDE 2021: Consolidação de base de dados do setor de transportes 2012 (EPE, 2012), sendo o momento de transporte atualizado com estudos mais recentes. No caso do modo aéreo, pelos anuários da ANAC e no caso do modo aquático, com base no estudo da ANTAQ (2014). A demanda de energia foi atualizada de acordo com o BEN (EPE, 2016).

No modo ferroviário, considerando o transporte de carga, ao analisar as eficiências energéticas calculadas por meio da base de dados da EPE, verificou-se que a eficiência energética estava no limite inferior do *benchmarking* internacional, logo, buscaram-se outros estudos do setor, sendo utilizados então, os dados do momento de transporte dos estudos da ANTT (2011 e 2016) e do consumo de energia de 2000 a 2011 de CNT (2012) e de 2012 a 2015 de EPE (2016b).

Para determinação da melhoria da eficiência energética desses modos, optou-se por adotar um referencial teórico para balizar os valores que serão utilizados. Para isso, utilizaram-se o Sims, *et al.* (2014), Façanha *et al.* (2012) e Vyas *et al.* (2013). A tabela 24 apresenta a eficiência energética por modo de transporte.

Tabela 24. Evolução do rendimento energético por modo de transporte, em kJ/t.km.

Ano	Aéreo	Marítimo ⁽¹⁾	Fluvial ⁽¹⁾	Ferrovário	Rodoviário ⁽²⁾	Dutoviário
2010	13.914	253	1.138	150	1.723	123
2015	13.566	284	227	123	1.739	121

Nota: (1) Divisão do modo aquático; (2) não considera veículos elétricos.

Fonte: Elaboração própria

5. Cenário de referência

O Cenário de referência mostra os prognósticos de atividade e participação que consideram uma evolução tendencial do setor de transportes, considerando o atendimento a NDC brasileira e os diversos estudos governamentais como Plano Setorial de Transporte e Mobilidade Urbana para Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima (PSTM), Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT), Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2026 e a nota técnica do Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050). Considerou-se, também, programas em andamento como o RenovaBio e o Rota 2030 (que sucederá o programa Inovar-Auto).

5.1. Hipóteses

Neste subitem serão apresentadas as hipóteses consideradas.

5.1.1. Divisão Modal

Através do estudo conduzido pelo *The International Council on Clean Transportation* (ICCT), (Façanha et al., 2012) e nos workshops do Comitê de Elaboração de Cenários do Projeto IES-Brasil 2050 para projeções da divisão modal até 2050, referente ao transporte de passageiros, adotaram-se as seguintes premissas:

- (1) Pequena migração de momento de transporte do modo rodoviário para o momento de transporte do modo ferroviário e aéreo;
- (2) Pequena migração do transporte individual para o transporte público por ônibus.

Como ponto de partida para divisão modal do transporte de carga, tentou-se levar em consideração a oferta de infraestrutura prevista pelo governo, no Plano Nacional de Logística e Transporte (PNLT, 2011), para o ano de 2031. No entanto, em função da não conclusão dos projetos ferroviários e hidroviários nos prazos temporais previstos, considerou-se um deslocamento do cronograma, julgando que o que foi previsto para 2015 seria realizado somente no ano de 2025, com postergação das divisões modais previstas para os anos seguintes até o ano de 2050.

Apesar disso, a divisão modal resultante levou a uma fração elevada de transferência modal para o modo ferroviário (36,41%), que acarretaria em elevados investimentos aparentemente incompatíveis com a evolução moderada do PIB Absoluto que foi usado para projetar o momento de transporte agregado de carga. Desta forma, optou-se por adotar a divisão modal do transporte de carga com base no estudo desenvolvido pelo *The International Council on Clean Transportation* (ICCT) (Façanha et al., 2012) para o modo ferroviário. Além disso, optou-se por adotar a evolução tendencial

para os modos dutoviário, aéreo e aquático (dividido em marítimo e fluvial), deixando o restante para o modo rodoviário. Estas premissas aproximam a previsão da divisão modal do transporte de carga daquela estimada pelo Estudo de Demanda de Energia 2050 (EPE 2016) e nas discussões ocorridas durante os workshops.

5.1.2. Frota

Quanto à evolução da frota até o ano de 2050, com base nos resultados obtidos pela abordagem *top-down* para os veículos convencionais, nas discussões estabelecidas nos *workshops* realizados, na experiência dos pesquisadores e no estudo da EPE (2016), considerou-se:

(1) quanto aos veículos leves (automóveis e comerciais leves) adotou-se uma taxa média de vendas dos veículos do tipo automóvel e comercial leve de 3,43% aa, de 2018 a 2050, com base na estimativa do PIB e nos estudos da ANFAVEA (2016) e EPE (2016). Para as motocicletas, considerou-se uma taxa de 2,8% aa até 2050 com base na estimativa do PIB e em MMA (2013)²;

(2) quanto aos veículos convencionais de uso coletivo, adotou-se a taxa de vendas dos veículos do transporte coletivo ônibus urbano, ônibus rodoviário e micro-ônibus para 5,0% aa até 2039 e de 2,5% aa até 2050 com base na estimativa da população e no estudo da EPE (2016);

(3) quanto à participação das vendas, os veículos alternativos de uso individual (híbridos e elétricos), adotou-se a taxa de vendas dos veículos do tipo automóvel por meio da observação do histórico de vendas de 2006 a 2015, fornecido pelo estudo realizado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), Vaz *et al.*; (2015).

Quanto à participação nas vendas de cada tipo de tecnologia até o ano de 2050, considerou-se:

(1) quanto aos automóveis dedicados à gasolina, observou-se uma participação de 4% das vendas em 2015. Em seguida, considerou-se uma queda linear até 2030, quando tal tecnologia não será mais comercializada;

(2) quanto aos automóveis dedicados a etanol, estes já não são mais comercializados deste de 2013;

² Esta taxa só valeria até 2030, mas foi adotada até 2050.

(3) quanto aos automóveis *flexible fuel*, observou-se uma participação de 95,95% das vendas em 2016. Em seguida, considerou-se uma queda linear até 2045, quando tal tecnologia não será mais comercializada (EPE, 2016a);

(4) quanto aos automóveis híbridos, observou-se uma participação de 0,05% das vendas em 2016. Em seguida, considerou-se um crescimento linear até 2045, quando a tecnologia atingirá 90% da participação. Em 2050 essa participação será de 82%, devido a maior participação dos veículos elétricos;

(5) quanto aos automóveis elétricos, observou-se uma participação de 0,001% das vendas em 2016. Em seguida, considerou-se um crescimento linear até 2045, onde alcançará uma participação de 10%. De 2045 a 2050, considerou-se um crescimento exponencial na participação das vendas, onde tal tecnologia atingirá 18% da participação, em 2050;

(6) quanto aos comerciais leves dedicados à gasolina, observou-se uma participação de 13% das vendas em 2016. Para 2050, considerou-se uma queda mais intensa até 2030, quando tal tecnologia não será mais comercializada. A última venda deverá ser em 2029, com uma participação de 1,18%;

(7) quanto aos comerciais leves dedicados a etanol, já não são mais comercializados deste de 2012;

(8) quanto aos comerciais leves *flexible fuel*, observou-se uma participação de 87% das vendas em 2016. Em seguida, considerou-se uma queda linear até 2040, quando alcançará 70% das vendas. Em seguida considerou-se uma queda mais intensificada até 2045, quando tal tecnologia não será mais comercializada (em nível nacional), hipótese apresentada no estudo da EPE (2016a). Sua última venda será em 2044, com uma participação de 10%;

(9) quanto aos comerciais leves híbridos, começa a ser comercializado em 2020, com participação de 2%. Considerou-se um crescimento médio de 119% das vendas até 2045, quando tal tecnologia atingirá 100% da participação;

(10) os veículos comerciais leves elétricos não serão considerados neste estudo;

(11) quanto as motocicletas, introdução da venda de motocicletas elétricas a partir de 2020 em substituição das motocicletas dedicadas à gasolina e parte das *flexible fuel*, alcançando uma participação em 2050 de 35% para as motos elétricas, 60% *flexible fuel* e 5% dedicadas a gasolina;

(12) quanto aos veículos convencionais de uso coletivo (ciclo Diesel), urbano convencionais e micro-ônibus, sua participação nas vendas, cairá dos atuais 99% em 2016 para 22% em 2045, onde permanecerá com essa participação até 2050.

(12.1) os micro-ônibus serão substituídos progressivamente por micro-ônibus elétricos *plug-in*, começando com 1% de participação em 2018 e alcançando uma participação 78% em 2050;

(12.2) quanto aos veículos alternativos de uso coletivo (híbridos e elétricos), aumentou-se a taxa de vendas dos veículos do transporte coletivo (híbridos diesel-elétrico e elétrico *plug-in*) do tipo ônibus urbano para que toda a frota destes veículos tenha uma divisão de 60% para os híbridos diesel-elétrico e 8% para os elétricos *plug-in* em 2050, conforme hipóteses do estudo da EPE (2016a).

(13) os ônibus rodoviários híbridos e elétricos não serão considerados neste estudo.

As premissas apresentadas de maior participação de veículos leves e ônibus elétricos e híbridos, foram baseadas nos estudos: Façanha (2012) e EPE (2016a). Além disso, considerou-se também a *Paris Declaration on Electro-Mobility and Climate Change & Call to Action Lima* – Paris Action Agenda (LPAA, 2015) que indica para o ano de 2030, que pelo menos 20% de todos os veículos de transporte rodoviário (passageiro e carga) serão elétricos (média mundial) e que os veículos leves serão os que mais vão contribuir para o alcance dessa meta. Baseou-se também, no programa *Mobilise Your City Local Governments in Developing Countries Take High Road to Low-Carbon* desenvolvido pela *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC, 2015) que visa apoiar países em desenvolvimento (África, Sul da Ásia, América do Sul, e Oriente Médio), a partir de 2020 para o desenvolvimento e a implementação de sustentabilidade urbana, tendo em vista que parceiros doadores já se comprometeram a doar 5,5 milhões de euros, em 2016.

Quanto aos veículos do transporte de carga, a estimativa de vendas futuras baseou-se na correlação do histórico de vendas dos caminhões com o PIB absoluto e pelas projeções realizadas no

relatório da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA, 2016), no estudo da EPE (2016), na experiência dos pesquisadores e nas discussões estabelecidas nos workshops.

- (1) quanto aos veículos convencionais (ciclo Diesel), considerou-se a taxa de vendas dos veículos comerciais leves e dos caminhões leve, semileve e médio como 3,15% aa de 2018 a 2025 e com 1,6% aa de 2026 até 2050;
- (2) para os veículos semipesados e pesados, considerou-se a taxa de 3,3% aa de 2018 a 2025 e com 0,7% aa de 2026 até 2050, fruto da transferência modal do transporte de carga do modo rodoviário para o ferroviário. Tendo como premissa a divisão modal apresentada na tabela 25, tais taxas foram obtidas, com base nos resultados de consumo de energia e momento de transporte alcançados pela metodologia *top-down*.

5.1.3. Uso de Energia

Neste subitem serão apresentadas as premissas relacionadas ao uso de energia no setor de transportes.

Fontes Convencionais

A seguir apresenta-se a relação das fontes convencionais de energia consideradas.

- Diesel: será considerada para os modos rodoviário, ferroviário e aquático (fluvial);
- Gasolina C: será considerada para o modo rodoviário;
- Óleo pesado: será considerada para o modo aquático (marítimo de cabotagem);
- Querosene de aviação: será considerada para o modo aéreo;
- Gasolina de aviação: será considerada para o modo aéreo de passageiros.

Vale ressaltar que para o caso do modo ferroviário, devido à inexpressiva representatividade do transporte de passageiros com veículos movidos a diesel, toda energia gasta com este combustível foi alocada no transporte de cargas. No caso do modo aéreo, toda a gasolina de aviação foi alocada

para o transporte de passageiros, visto que esse tipo de combustível é utilizado por aviões de pequeno porte, modelos utilizados para pulverização de lavouras e o transporte especial de passageiros e que não possuem capacidade de transportar uma quantidade relevante de carga. Já o querosene de aviação foi alocado às modalidades de transporte, como grande parte da frota de aeronaves transporta passageiros e cargas no mesmo voo.

Fontes Alternativas

A seguir apresenta-se a relação das fontes alternativas de energia consideradas.

- Gás Natural Veicular (GNV): será considerado para o modo rodoviário em automóveis e veículos comerciais leves adaptados para uso de GNV na forma bicombustível;
- Biodiesel: será considerado para os modos rodoviário, ferroviário e aquático (de passageiro), tendo em vista que este biocombustível será considerado em adição ao diesel de petróleo. Considerou-se que a participação do biodiesel no diesel de petróleo (BX) será de B8 (8% biodiesel e 92% diesel de petróleo) em 2017, este percentual será elevado para 9% e 10% a cada 12 meses subsequentes, portanto, em março de 2019 será de B10, em 2030 será de B12 e B15 em 2040. Tal premissa foi adotada com base no discurso da Presidente Dilma Rousseff (Planalto, 2016), tendo em vista o compromisso do Governo Brasileiro assumido durante a realização da COP 21 (UBRABIO, 2015);
- Etanol anidro: será considerado para o modo rodoviário em adição de até 27% a gasolina na forma de etanol anidro;
- Etanol Hidratado: será considerado para o modo rodoviário, para os automóveis e veículos comerciais leves *flexible fuel* e híbridos;
- Energia elétrica: será considerada para os modos, dutoviário, rodoviário e ferroviário (passageiros).

Para o caso específico do transporte fluvial, que atualmente não possui adicional de biodiesel, como acontece para os demais modos que o utilizam em percentuais misturados ao diesel, considerou-se tal adição, a partir do ano de 2025, em percentuais iguais ao aplicado para os outros modos.

Quanto à escolha do tipo de combustível para os veículos do tipo *flexible fuel* e para os veículos leves híbridos (automóveis e veículos comerciais leves), até o ano de 2012, baseou-se em dados históricos. De 2012 a 2017 a utilização foi estimada com base no custo dos respectivos combustíveis e no balanço energético nacional (EPE, 2017). A partir daí a utilização deverá ser ajustada linearmente até alcançar o percentual de 70% para o etanol hidratado em 2050, com base na NDC da brasileira que visa aumentar o consumo de biocombustíveis na matriz energética brasileira para aproximadamente 18% até 2030, aumentando a oferta de etanol inclusive por meio do aumento da parcela de biocombustíveis avançados (segunda geração). O percentual de 70% foi calculado com base na evolução do modo rodoviário de passageiros, no programa Renova-Bio, no deslocamento da previsão do PNMC sobre utilização do etanol em substituição à gasolina e em uma visão conservadora da estimativa declarada na NDC brasileira, da produção de etanol em 2025 e 2030 de 45 e 54 bilhões de litros, respectivamente.

Eficiência Energética

Para determinação da melhoria da eficiência energética desses veículos, optou-se por adotar um referencial teórico para balizar os valores que serão utilizados, para isso utilizou-se o 5º Relatório de Análise do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas Capítulo 8, elaborado pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), (Sims, R et al., 2014) e pelo U.S. *Department of Energy*, Vyas et al., (2013). Portanto, foram adotados os valores de referência conforme o nível de eficiência energética estabelecida para cada modo, bem como o ano em que se atinge tal eficiência, conforme ilustrado na Tabela 25.

Tabela 25. Potencial de melhorias em eficiência energética de todos os modos de transportes no Cenário de Referência

Modo	Ações	Potencial de melhorias em eficiência energética	
		2030	2050
Aéreo	Melhorias no projeto e construção de aeronaves, como redução de peso, resistência aerodinâmica, introdução de <i>winglets</i> e <i>riblets</i> e aprimoramento no desempenho dos motores.	20% a 40%	23% a 65%

Modo	Ações	Potencial de melhorias em eficiência energética	
		2030	2050
	Melhorias operacionais se tornam possíveis por meio da utilização de sistemas de navegação por satélite, o que reduz o congestionamento e o consumo de combustível.		
Aquático	Melhores projetos de navios para redução de peso; motores e sistemas de transmissão eficientes; sistemas de recuperação de calor; sistemas auxiliares para geração de energia e redução da resistência aerodinâmica e hidrodinâmica.	Até 15 % (marítimo)	Até 30% (marítimo)
	Implantar medidas para operação em condições ótimas e controle de velocidade de cruzeiro.		
		Implantação de medidas relacionadas à reforma e aprimoramento da manutenção de embarcações.	Até 5% (navegação interior)
Ferroviário	Uso de sistemas de propulsão de maior eficiência e de frenagem regenerativa, além de aperfeiçoamentos no motor a diesel.	15% a 17%	30% a 35%
	Melhorias aerodinâmicas e redução do peso das composições.		
	Uso de freios pneumáticos controlados eletronicamente (ECP) e sistema de controle PTC (<i>positive train control</i>) podem reduzir os congestionamentos e reduzir o tempo de operação em marcha lenta o que resultaria em um aumento na eficiência energética.		
	Modernização da infraestrutura do sistema ferroviário, com o mesmo intuito do item anterior.		
	Uso de locomotivas híbridas e <i>Genset</i> .		
Rodoviário	Redução do peso dos veículos, redução da resistência aerodinâmica, uso de pneus de baixa resistência ao rolamento e/ou pneus radiais e eletrificação dos acessórios.	15% a 30% (HDV) Até 25% (LDV)	25% a 50% (HDV) Até 50% (LDV) Motos: 10% e 20%
	Melhorias tecnológicas nos motores e uso de tecnologias de recuperação de calor, como: motores com recuperação de energia por turbina acoplada e de ciclo “achatado”, uso de ventilador do motor com acionamento intermitente e de válvulas de admissão e descarga do motor com atuação variável (VAV), além de motores turbo alimentados.		
	Uso de sistema de pós-tratamento de gases de descarga com arrefecimento avançado, que proporciona melhor queima do combustível e promove aumento do rendimento energético.		
	Redução das perdas por fricção no sistema de propulsão, uso de transmissão automatizada e aprimoramento no turbo compressor.		
	Melhorias em manutenção e implementação de programas de conservação de veículos.		
	<i>Eco-driving</i> , redução do uso da marcha lenta e uma melhor gestão do tráfego e escolha de rotas.		
	Monitoramento das viagens (com metas e incentivos financeiros aos motoristas), além da implantação de projetos visando a redução do consumo de combustíveis, como o Projeto Transportar.		
	Uso de veículos híbridos (diesel-elétrico)		
	20% a 30% (HDV) Até 35% (LDV)		
Dutoviário	Aumento de capacidade e aprimoramento de uso.	Até 7,5%	Até 17,5%

Fonte: Elaboração própria, com base no Relatório de Análise do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - Capítulo 8 (Sims, R *et al.*, 2014), *The International Council on Clean Transportation* (ICCT), Façanha *et al.*, (2012) e Vyas *et al.* (2013).

A partir dos resultados obtidos da aplicação do método *top-down*, identificou-se a melhoria de eficiência alcançada e consumo estimado, fez-se então uma comparação da melhoria de eficiência global com a eficiência energética apresentada nas premissas adotadas para o modo rodoviários. O

consumo estimado foi comparado com o consumo obtido pelo procedimento para cálculo do consumo de combustível para o modo rodoviário da metodologia *bottom-up*. A partir das comparações realizadas, do conhecimento técnico da equipe envolvida no estudo e da estimativa apresentada no Estudo de Demanda de Energia 2050 (EPE, 2016), a melhoria de eficiência foi ajustada.

5.2. Resultados

Nesta etapa, tem-se a apresentação dos resultados para o Cenário de Referência. A Tabela 26 apresenta a evolução do momento de passageiros e de carga.

Tabela 26. Evolução do momento de transporte no Cenário de Referência

Ano	Aéreo ¹	Aquático ¹	Ferrovário ¹	Rodoviário ¹	Dutoviário ²	Aéreo ²	Ferrovário ²	Rodoviário ²	Aquático ²
2010	96.700	1.196	27.352	1.476.161	32.438	1.054	277.930	633.783	173.024
2020	125.350	1.225	38.879	1.721.872	30.486	1.541	327.807	729.709	124.557
2030	183.450	1.738	54.689	2.067.668	35.514	2.314	398.131	838.870	246.265
2040	250.153	2.430	72.544	2.454.346	41.881	3.440	553.382	988.958	352.533
2050	315.727	3.470	98.534	3.051.793	53.413	5.341	824.434	1.249.336	538.139

¹ 10⁶p.km; ²10⁶t.km.

No tocante à demanda energética, a Tabela 27 demonstra a evolução entre os anos de 2010 e 2050.

Tabela 27. Evolução da demanda energética no Cenário de Referência (10³ tep)

Ano	Biodiesel	Diesel	Etanol anidro	Etanol hidratado	Eletricidade	Gasolina A	GNV	Óleo combustível	Querosene
2010	1.563	32.217	3.690	8.166	238	17.108	1.767	852	3.228
2020	3.611	34.972	5.636	9.326	279	22.012	1.610	668	3.361
2030	4.931	39.093	4.077	17.641	475	15.947	1.905	1.235	4.747
2040	6.974	43.010	3.343	24.414	1.320	13.103	2.223	1.630	6.182
2050	8.172	50.813	2.472	28.225	2.900	9.720	2.156	2.306	7.587

6. Cenário 1,5°C

Para o Cenário 1,5°C, além dos prognósticos realizados para o Cenário de referência, consideram-se novos incentivos e investimentos como:

- Transporte de passageiros: eletromobilidade; maior participação do transporte metroviário de passageiros; aumento da frota circulante de veículos compartilhados; maior participação dos biocombustíveis (incluindo novos como o bioquerosene); incentivo ao transporte ativo e aos veículos com sistema de propulsão alternativos (elétricos e híbridos);
- Transporte de carga: busca pelo equilíbrio da divisão modal por meio de investimentos em infraestrutura e políticas públicas; eletrificação das ferrovias; renovação da frota de caminhões; maior penetração de comerciais leves, caminhões semileves e leves elétricos a bateria (BEV); maior penetração de caminhões médios com sistema de propulsão híbridos elétricos; aumento da eficiência logística e da participação do biodiesel e introdução do bioquerosene e do bio-óleo.

6.1. Hipóteses

Neste subitem serão apresentadas as hipóteses consideradas.

6.1.1. Divisão Modal

Com base no estudo realizado por *The International Council on Clean Transportation* (ICCT) (Façanha et al., 2012) e nos workshops realizados do Projeto IES-Brasil 2050, para projeções da divisão modal até 2050, adotou-se as seguintes premissas:

- (1) Migração do momento de transporte, do modo rodoviário para o modo ferroviário;
- (2) Migração do momento de transporte do modo motorizado (urbano) para o momento de transporte do modo não motorizado segundo premissas de Façanha et al., (2012);
- (3) Migração do transporte individual para o transporte público por ônibus.

Para o transporte de carga, além das premissas consideradas no Cenário de Referência, considerou-se:

- (1) Redução do momento de transporte de carga por meio de um ganho de eficiência logística, ou seja, uma redução do momento de transporte dos modos rodoviário e ferroviário em função de um ganho de eficiência logística que pode ser obtido pelas empresas; e

- (2) Adicionalmente, considerou-se um potencial de eletrificação do transporte ferroviário, em uma extensão de malha equivalente a 14,5% da movimentação em momento de transporte, em até 20 anos.

6.1.2. Frota

Com relação à evolução da frota, para a projeção até o ano de 2050, adotaram-se as seguintes considerações em relação as vendas por tipo de veículo, com base nos resultados obtidos pelo modelo *top-down* e no PIB per capita. Quanto à participação nas vendas de cada tipo de tecnologia, baseou-se na experiência dos pesquisadores, em estudos internacionais, na tendência internacional e em discussões estabelecidas nos *workshops* realizados, considerou-se:

(1) quanto aos veículos leves (automóveis e comerciais leves) adotou-se uma taxa média de vendas dos veículos do tipo automóvel e comercial leve de 3,43% aa, de 2018 a 2050, com base na estimativa do PIB e nos estudos da ANFAVEA (2016) e EPE (2016). Para as motocicletas, considerou-se uma taxa de 2,8% aa até 2050 com base na estimativa do PIB e em MMA (2013)³;

(2) quanto aos veículos convencionais de uso coletivo, adotou-se a taxa de vendas dos veículos do transporte coletivo ônibus urbano, ônibus rodoviário e micro-ônibus para 5,0% aa até 2039 e de 2,5% aa até 2050 com base na estimativa da população e no estudo da EPE (2016);

(3) quanto a participação das vendas, os veículos alternativos de uso individual (híbridos e elétricos), adotou-se a taxa de vendas dos veículos do tipo automóvel, por meio da observação do histórico de vendas de 2006 a 2015, fornecido pelo estudo realizado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), Vaz *et al.*; (2015);

Quanto à participação nas vendas de cada tipo de tecnologia até o ano de 2050, considerou-se:

(1) quanto aos automóveis dedicados à gasolina, observou-se uma participação de 4% das vendas em 2015. Em seguida, considerou-se uma queda linear até 2030, quando tal tecnologia não será mais comercializada;

³ Esta taxa só valeria até 2030, mas foi adotada até 2050.

(2) quanto aos automóveis dedicados a etanol, estes já não são mais comercializados deste de 2013;

(3) quanto aos automóveis *flexible fuel*, observou-se uma participação de 95,95% das vendas em 2016. Em seguida, considerou-se uma queda linear até 2040, quando tal tecnologia não será mais comercializada;

(4) quanto aos automóveis híbridos, observou-se uma participação de 0,05% das vendas em 2016. Em seguida, considerou-se um crescimento linear até 2040, quando tal tecnologia atingirá 60% da participação. Em 2050 essa participação será de 40%, devido a maior participação dos veículos elétricos;

(5) quanto aos automóveis elétricos, observou-se uma participação de 0,001% das vendas em 2016. Em seguida, considerou-se um crescimento linear até 2040, onde alcançará uma participação de 40%. De 2040 a 2050, considerou-se um crescimento exponencial na participação das vendas, onde tal tecnologia atingirá 60% da participação, em 2050;

(6) quanto aos comerciais leves dedicados à gasolina, observou-se uma participação de 13% das vendas em 2016. Para 2050 considerou-se uma queda mais intensa até 2030, quando tal tecnologia não será mais comercializada. Sua última venda será em 2029, com uma participação de 0,7%;

(7) quanto aos comerciais leves dedicados a etanol, estes já não são mais comercializados deste de 2012;

(8) quanto aos comerciais leves *flexible fuel*, observou-se uma participação de 87% das vendas em 2016. Em seguida, considerou-se uma queda linear até 2040, último ano de comercialização, quando alcançará 10% das vendas;

(9) quanto aos comerciais leves híbridos, considerou-se que serão comercializados a partir de 2020 com 2% de participação. Em seguida, considerou-se um crescimento linear até 2025 e exponencial até 2040, quando tal tecnologia atingirá 90% da participação. Em 2050 essa participação será de 60%, devido a maior participação dos veículos elétricos;

(10) quanto aos comerciais elétricos, considerou-se que serão comercializados a partir de 2030 com 1% de participação. Em seguida, considerou-se um crescimento linear até 2040, onde alcançará uma participação de 10%. De 2040 a 2050, considerou-se um crescimento exponencial na participação das vendas, onde tal tecnologia atingirá 40% da participação;

(11) quanto as motocicletas, introdução da venda de motocicletas elétricas a partir de 2020 em substituição das motocicletas dedicadas à gasolina e parte das *flexible fuel*. Considerou-se um crescimento linear até 2040, onde alcançará uma participação de 40%. De 2040 a 2050, considerou-se um crescimento exponencial na participação das vendas, onde tal tecnologia atingirá 70% da participação;

(12) quanto aos veículos convencionais de uso coletivo (ciclo Diesel), urbano convencionais e micro-ônibus, sua participação nas vendas, cairá dos atuais 99% em 2016 para 20% em 2040, último ano de comercialização;

(12.1) os micro-ônibus serão substituídos progressivamente por micro-ônibus elétricos *plug-in*, começando com 5% de participação em 2020 e alcançando uma participação 75% em 2045 e de 100% em 2050;

(12.2) quanto aos veículos alternativos de uso coletivo (híbridos e elétricos), aumentou-se a taxa de vendas dos veículos do transporte coletivo (alternativo – híbridos diesel-elétrico e elétrico *plug-in*) do tipo ônibus urbano para que toda a frota destes veículos tenha uma divisão de 20% para os híbridos diesel-elétrico e 60% para os elétricos *plug-in* em 2039 e de 25% e 75% em 2050, respectivamente;

(13) quanto ônibus rodoviários híbridos e elétricos, estes não serão considerados neste estudo;

Quanto aos veículos do transporte de carga, a estimativa de vendas futuras, por tipo de caminhão e tecnologia, baseou-se na correlação do histórico de vendas dos caminhões com o PIB absoluto e pelas projeções realizadas no relatório da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA, 2016), com base nos resultados obtidos pelo modelo *top-down*, na experiência dos pesquisadores e nas discussões estabelecidas *nos workshops*, sendo elas:

- (1) quanto aos caminhões semileves e leves ciclo diesel, observou-se uma participação de 100% das vendas em 2016, sendo mantido até 2030. Em seguida, considerou-se uma queda acentuada até 2045, chegando a uma participação de 50% e permanecendo até 2050;
- (2) quanto aos caminhões semileves e leves ciclo elétricos *plug-in*, considerou-se que serão comercializados a partir de 2030 com 10% de participação. Em seguida, considerou-se um crescimento linear até 2045, quando tal tecnologia atingirá 50% da participação, se mantendo até 2050;
- (3) quanto aos caminhões médios ciclo diesel, observou-se uma participação de 100% das vendas em 2016, sendo mantido até 2030. Em seguida, considerou-se uma queda acentuada até 2050, chegando a uma participação de 20%;
- (4) quanto aos caminhões médios híbridos diesel-elétrico, considerou-se que serão comercializados a partir de 2030 com 5% de participação. Em seguida, considerou-se um crescimento linear até 2050, quando tal tecnologia atingirá 50% da participação;
- (5) quanto aos caminhões médios elétricos *plug-in*, considerou-se que serão comercializados a partir de 2030 com 1% de participação. Em seguida, considerou-se um crescimento linear até 2050, quando tal tecnologia atingirá 30% da participação; e
- (6) considerou-se a introdução dos caminhões semipesados e pesados híbridos diesel-elétrico a partir do ano de 2030, alcançando uma participação em 2050, de 12% considerando toda a frota de veículos de carga.

6.1.3. Uso de Energia

Neste subitem serão apresentadas as premissas relacionadas ao uso de energia no setor de transportes.

Fontes Convencionais

A seguir apresenta-se a relação das fontes convencionais de energia consideradas.

- Diesel: será considerada para os modos rodoviário, ferroviário e aquático (fluvial);
- Gasolina C: será considerada para o modo rodoviário;
- Óleo pesado: será considerada para o modo aquático (marítimo de cabotagem);
- Querosene de aviação: será considerada para o modo aéreo; e
- Gasolina de aviação: será considerada para o modo aéreo de passageiros.

Vale ressaltar que para o caso do modo ferroviário, devido à inexpressiva representatividade do transporte de passageiros com veículos movidos a diesel, toda energia gasta com este combustível foi alocada no transporte de cargas.

No caso do modo aéreo, toda a gasolina de aviação foi alocada para o transporte de passageiros, visto que esse tipo de combustível é utilizado por aviões de pequeno porte, modelos utilizados para pulverização de lavouras e o transporte especial de passageiros e que não possuem capacidade de transportar uma quantidade relevante de carga. Já o querosene de aviação foi alocado para ambas às modalidades de transporte, como grande parte da frota de aeronaves transporta passageiros e cargas no mesmo voo.

Fontes Alternativas

A seguir apresenta-se a relação das fontes alternativas de energia consideradas.

- GNV: será considerado para o modo rodoviário em automóveis e veículos comerciais leves adaptados para uso de GNV na forma bicombustível;
- Biodiesel: será considerado para os modos rodoviário, ferroviário e aquático (de passageiro), tendo em vista que este biocombustível será considerado em adição ao diesel de petróleo. Considerou-se que a participação do biodiesel no diesel de petróleo (BX) será de B8 (8% biodiesel e 92% diesel de petróleo) em 2017, este percentual será elevado para 10% em 2018, 15% em 2025, 20% em 2030, 25% em 2040 e 30% em 2045.

- Etanol anidro: será considerado para o modo rodoviário em adição de até 27% a gasolina na forma de etanol anidro;
- Etanol Hidratado: será considerado para o modo rodoviário, para os automóveis e veículos comerciais leves *flexible fuel* e híbridos.
- Energia elétrica: será considerada para os modos, dutoviário, rodoviário e ferroviário (passageiros).
- Bio-óleo: será considerado para o modo aquático (marítimo de cabotagem – no que couber) a partir do ano de 2025. Considerou-se que a participação do bio-óleo no diesel de petróleo (BX) será de B5 (5% bio-óleo e 95% diesel de petróleo) em 2025, B7 em 2030, B10 em 2035 e B20 em 2040.
- Bioquerosene: será considerado para o modo aéreo a partir do ano de 2020. Considerou-se que a participação do bioquerosene no querosene de aviação será de B5 (5% bioquerosene e 95% diesel de petróleo) em 2020, B7 em 2025, B10 em 2030, B15 em 2035 e B20 em 2040.

Para o caso específico do transporte fluvial, que atualmente não possui adicional de biodiesel, como acontece para os demais modos que o utilizam em percentuais misturados ao diesel, considerou-se tal adição, a partir do ano de 2025, em percentuais iguais ao aplicado para os outros modos.

Quanto à escolha do tipo de combustível para os veículos do tipo *flexible fuel* e para os veículos leves híbridos (automóveis e veículos comerciais leves), até o ano de 2012, baseou-se em dados históricos (veículos *flexible fuel* convencionais). De 2012 a 2015 a utilização foi estimada com base no custo dos respectivos combustíveis e no balanço energético nacional (EPE, 2017). A partir daí a utilização deverá ser ajustada linearmente até alcançar o percentual de 90% para o etanol hidratado em 2050.

O percentual de 90% foi calculado com base na evolução do modo rodoviário de passageiros e na queda da demanda devido à forte penetração de veículos alternativos (híbridos e elétricos).

Eficiência Energética

Para este Cenário, será considerado o potencial de melhorias em eficiência energética máxima identificado (Tabela 25), para os anos de 2030 e 2050.

6.2. Investimentos

Para implantação das medidas presentes no Cenário 1,5°C, foram estimados os investimentos necessários, considerando dois períodos (2021 – 2030 e 2031 – 2050). A Tabela 28 evidencia os custos incrementais para cada medida em relação ao Cenário de Referência.

Tabela 28. Investimento total por período para as principais medidas no Cenário 1,5° C.

Modo	Atividade	Medida	Investimento total no período 2021 - 2030 (milhões R\$2015; taxa desconto 8% a.a.; VP2021)	Investimento total no período 2031 - 2050 (milhões R\$2015; taxa desconto 8% a.a.; VP 2031)
Ferroviário	Carga	Eletrificação de ferrovias	185	3.635
Ferroviário	Carga	Expansão do transporte ferroviário de carga	1.560	11.677
Ferroviário	Passageiros	Expansão do transporte ferroviário de passageiros (Metrô, trens urbanos e VLT).	8.166	207.621
Rodoviário	Passageiros	Substituição da frota de veículos leves a combustão interna por veículos elétricos <i>plug-in</i>	904	138.238
Rodoviário	Passageiros	Substituição da frota de ônibus urbanos a combustão interna por ônibus elétricos <i>plug-in</i>	6.660	9.121
Rodoviário	Carga	Substituição da frota de veículos caminhões semileves e leves ciclo diesel por caminhões elétricos <i>plug-in</i>	20	2.679
Aéreo	Passageiros e carga	Adição de bioquerosene na mistura do querosene	458	2121
Aquático	Carga	Adição do bio-óleo na mistura do óleo combustível	4	44
Rodoviário	Passageiros	Ganhos de eficiência veículos leves.	18.094	107.649
Rodoviário	Passageiros e carga	Ganhos de eficiência (veículos pesados).	221	335

6.3. Resultados

Nesta etapa, tem-se a apresentação dos resultados para o Cenário 1,5°C. A Tabela 29 apresenta a evolução do momento de passageiros e de carga.

Tabela 29. Evolução do momento de transporte no Cenário 1,5° C.

Ano	Aéreo ¹	Aquático ¹	Ferrovário ¹	Rodoviário ¹	Dutoviário ²	Aéreo ²	Ferrovário ²	Rodoviário ²	Aquático ²
2010	96.700	1.196	27.352	1.476.161	32.438	1.054	277.930	633.783	173.024
2020	125.350	1.225	38.879	1.703.832	30.486	1.541	317.973	707.818	124.557
2030	167.989	1.752	66.919	2.005.796	35.515	2.314	409.705	753.052	260.107
2040	212.352	2.445	125.076	2.311.804	41.881	3.440	575.208	824.253	394.506
2050	277.562	3.470	225.519	2.745.676	53.413	5.341	861.297	967.261	614.253

¹ 10⁶p.km; ²10⁶t.km.

No tocante à demanda energética, a Tabela 30 demonstra a evolução entre os anos de 2010 e 2050.

Tabela 30. Evolução da demanda energética no Cenário 1,5° C (10³ tep).

Ano	Biodiesel	Bioquerosene	Bio-óleo	Diesel	Etanol anidro	Etanol hidratado	Elettricidade	Gasolina A	GNV	Óleo combustível	Querosene
2010	1.563	0	0	32.217	3.690	8.166	238	17.108	1.767	851	3.228
2020	3.611	0	0	34.972	5.636	9.326	279	22.012	1.610	667	3.361
2030	7.727	397	83	33.348	3.597	15.873	852	14.077	1.518	1.174	3.830
2040	8.831	728	164	28.847	1.772	19.474	3.553	6.978	364	1.576	4.418
2050	9.481	1.226	356	24.386	419	19.206	7.676	1.714	0	2.158	5.252

6.4 Custos de mitigação das medidas consideradas⁴

A seguir, apresenta-se uma síntese dos custos de mitigação estimados. Foram considerados valores em dólares de 2015; barril de petróleo a 87 US\$ no período até 2050 (baseado no cenário '450 Scenario' do World Energy Outlook 2015 da Agência Internacional de Energia); e taxa de desconto: 8%

⁴ Ver detalhes no relatório de microeconomia do projeto IES-Brasil 2050: Grottera, C. (2018). Custos de Mitigação até 2050 no Cenário de 1,5°C. Disponível em www.centroclima.coppe.ufrj.br

a.a.. Os custos de mitigação de 2021 a 2030 estão expressos em valor presente de 2021 e os custos de mitigação de 2031 a 2050 estão expressos em valor presente de 2031.

Tabela 31. Potencial de mitigação e custo unitário de abatimento das medidas consideradas

Medida	2021-2030		2031-2050	
	Redução de emissões (Mt CO ₂ e)	Custo unitário de abatimento (US\$/tCO ₂ e)	Redução de emissões (Mt CO ₂ e)	Custo unitário de abatimento (US\$/tCO ₂ e)
Veículos leves elétricos	1,1	-1264,8	88,8	-465,2
Ônibus urbano elétrico	16,6	-20,0	258,3	-59,4
Caminhões elétricos	0,0	92,5	37,7	-81,5
Expansão de ferrovias a diesel	14,2	-167,1	127,0	-133,9
Eletrificação da malha ferroviária existente	0,4	-37,5	8,6	1,7
Transporte ferroviário de passageiros	1,4	1591,8	30,4	1867,8
Bioóleo	1,1	1,7	13,2	1,3
Bioquerosene	12,0	9,6	89,6	4,9

7. Comparação dos resultados

No cenário de referência, em 2050, a participação de combustíveis fósseis no transporte de carga atinge 87% do total demandado, enquanto que no transporte de passageiro a participação é de 43%. No Cenário 1,5°C, as participações de combustíveis fósseis são reduzidas para 72% (transporte de carga) e 24% (transporte de passageiros). As reduções no transporte de carga são justificadas em decorrência do aumento da participação dos biocombustíveis (13%). Já no transporte de passageiros, são justificadas em decorrência do aumento da participação dos biocombustíveis (52%) e do aumento da participação da energia elétrica (5%), devido a maior participação de veículos elétricos.

7.1. Mitigações

A Tabela 31 apresenta a evolução das emissões de CO₂e do Cenário de Referência e do Cenário 1,5°C. Evidencia-se redução de 121.540 Gg de CO₂e em 2050 no Cenário 1,5°C em relação ao Cenário de Referência. O modo rodoviário apresenta a maior redução (60%), sobretudo devido ao aumento da eletromobilidade e a ganhos de eficiência (carga e passageiros), seguido do aéreo (29%), ferroviário (28%) e aquático (13%).

Tabela 32. Evolução das emissões de CO₂e nos Cenário de Referência e 1,5°C (Gg).

Ano	Cenário de referência					Cenário 1,5°C				
	Rodoviário	Ferrovário	Aéreo	Aquático	Total	Rodoviário	Ferrovário	Aéreo	Aquático	Total
2010	153.628	2.959	9.865	4.065	170.517	153.628	2.959	9.865	4.065	170.517
2020	176.637	2.630	10.248	2.874	192.389	176.637	2.630	10.248	2.874	192.389
2030	171.789	3.063	14.473	5.403	194.729	147.496	2.715	11.709	5.076	166.995
2040	175.592	3.758	18.848	7.763	205.962	108.575	3.018	13.528	7.236	132.357
2050	187.811	5.059	23.126	11.749	227.745	75.951	3.629	16.461	10.164	106.205

Da mesma forma, o Gráfico 2 ilustra a evolução do total das emissões de CO₂e para ambos os cenários. Torna-se possível a visualização da redução após o ano base até 2050.

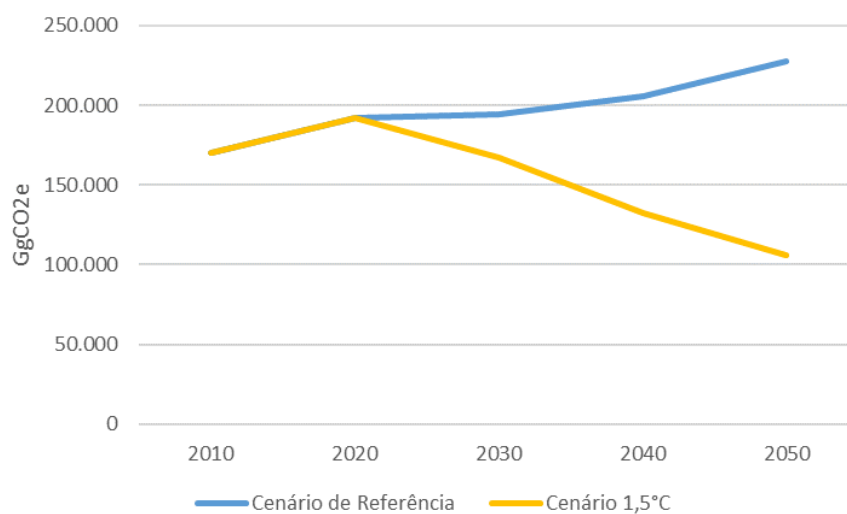


Gráfico 2. Evolução do total de emissões para o Cenário de Referência e Cenário 1,5°C.

As Gráficos 3 e 4 ilustram a evolução do total de emissões em relação ao momento para o transporte de passageiros (GgCO₂e/p.km) e carga (GgCO₂e/t.km). Conforme ilustrado, em ambos os casos há uma política de redução das emissões mais agressiva para o Cenário 1,5°C a partir do ano base.

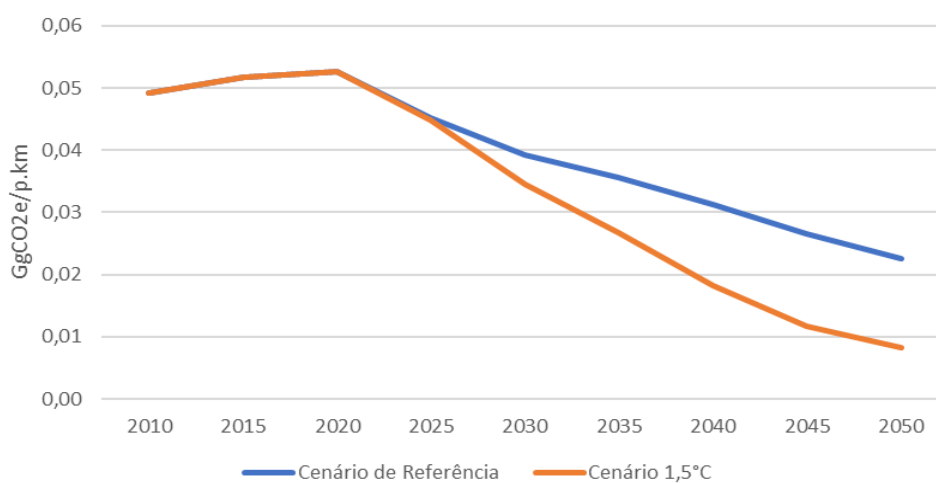


Gráfico 3. Evolução do total de emissões em relação ao momento para o transporte de passageiros.

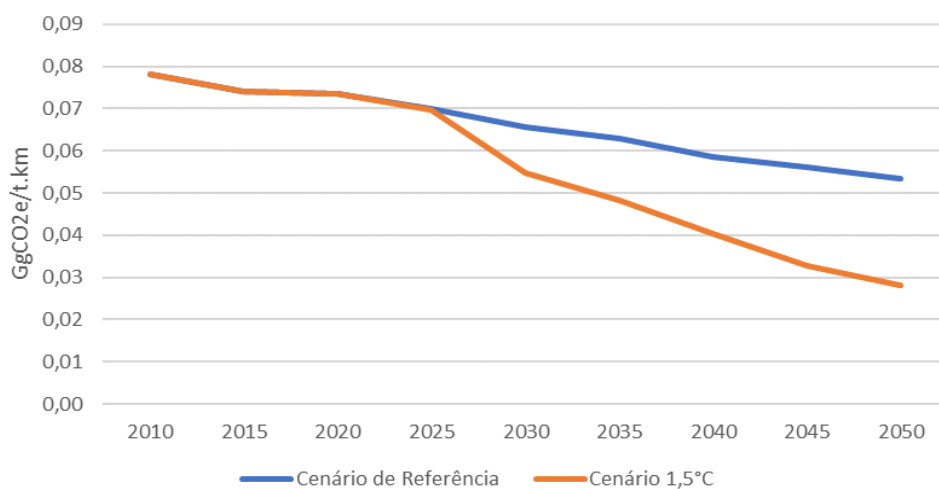


Gráfico 4. Evolução do total de emissões em relação ao momento para o transporte de carga.

Analisando o Gráfico 3, observa-se que a intensidade de emissões do transporte de passageiros reduz cerca de 56% no cenário de referência e 84% no Cenário 1,5°C. No transporte de carga (Gráfico 4), a redução é de 28% e 62% respectivamente.

O Gráfico 5 mostra o custo de implantação total das tecnologias do Cenário 1,5°C(CAPEX) que permitiram a mitigação ilustrada nos gráficos anteriores. Para a estimativa, considerou-se o valor presente com taxa de desconto de 8% a.a.

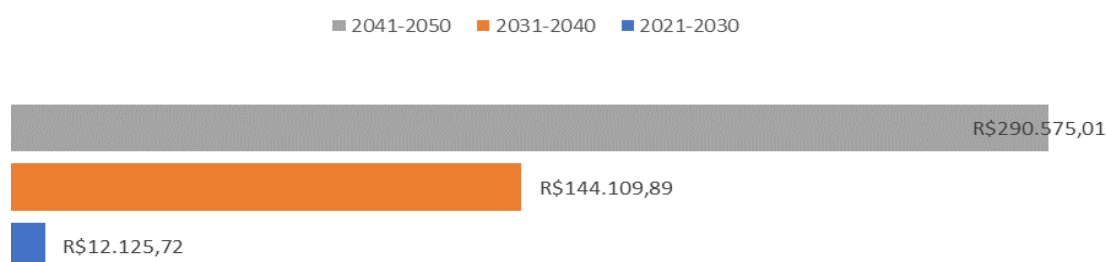


Gráfico 5. CAPEX total (mi R\$) entre o período 2021-2050.

O custo médio de abatimento (CMA), ilustrado no Gráfico 6 para os períodos 2021-2030 e 2031-2050, mostra que o custo de abatimento da implantação das diversas tecnologias previstas no Cenário 1,5°C varia conforme o escopo.

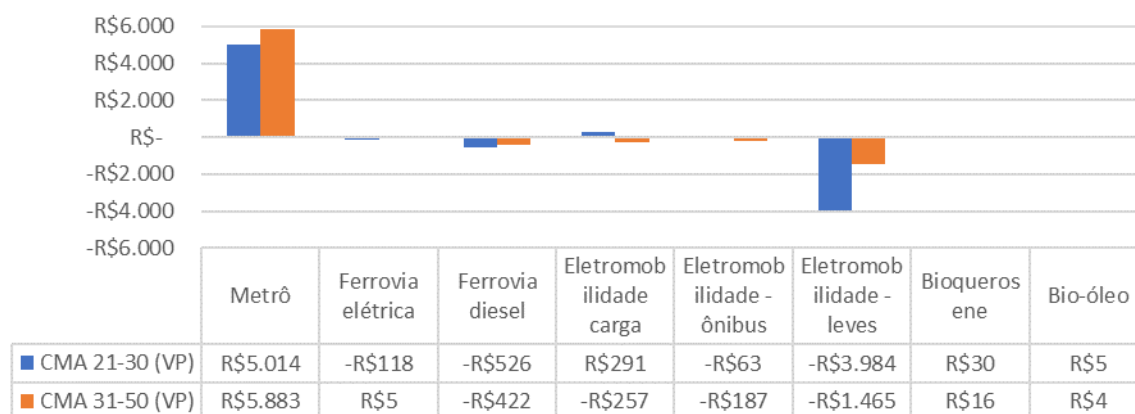


Gráfico 6. CMA a partir das implantações de medidas descritas no Cenário 1,5°C (em mi R\$).

No caso do sistema metroviário, o impacto em torno de 5 bilhões de reais por período foi em decorrência do alto custo de implantação da infraestrutura, superando a economia por combustíveis, manutenção (OPEX) e os abatimentos com emissões.

No caso da eletromobilidade dos veículos leves, há economia de R\$3.984 no primeiro período e de R\$1.465 no segundo, pois embora os veículos elétricos (BEV) possuam valor de mercado superior aos veículos a combustão interna e necessitem de investimentos na eventual ampliação da rede de distribuição de energia elétrica e na implantação de subestações para o seu abastecimento, seus custos com energia e de manutenção são menores, além de possuírem uma vida útil superior e não emitirem GEE e poluentes atmosféricos locais pelo uso final do veículo.

8. Prospecção Tecnológica para a Construção de um Cenário Disruptivo

A proposta inicial de premissas para o Cenário Disruptivo foi realizada com base em medidas de mitigação apostadas pela literatura especializada e em tendências mercadológicas. As principais medidas acordadas com o CEC e suas respectivas penetrações ao longo do horizonte são apresentadas na Tabela 32.

Tabela 33. Principais medidas de mitigação levantadas para a construção de um Cenário Disruptivo.

Medidas de mitigação	Penetração da tecnologia
Frota compartilhada.	Redução das viagens: 10% em 2020 e 40% em 2050.
Transporte ativo.	Participação na divisão modal 15% de transporte urbano em 2050.
Escalonamento de horários (com aumento do <i>home office</i>).	Redução do padrão das viagens urbanas no horário de pico: 17% em 2050.
Uso de Sistemas de informação.	Redução em 5% a 10% das viagens nos principais trechos (RJ-SP-DF) em 2050.
Desestímulo ao uso de veículos MCI (com incentivo ao uso de fontes limpas).	Encerramento das vendas de veículos MCI em 2040.
Qualificação da frota de ônibus.	70% da frota de ônibus urbano tipo BEV em 2050.
Sistema de certificação para o transporte de carga.	15% de melhoria na eficiência energética atual em 2050.
Caminhões leves a etanol.	Participação de 50% da frota circulante em 2050.
<i>Hyperloop</i> para transporte de carga.	Diminuição da participação de veículos de carga médio e pesado.
Dirigível para transporte de carga	
Eletrificação das ferrovias para transporte de carga.	Participação de 25% da atividade de transporte em 2050.
Uso de <i>Drones</i> (VANT) para transporte de carga.	Diminuição da participação de veículos de carga semileve e leve

9. Referências Bibliográficas

- ABRACICLO, Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas. ABRACICLO, Ciclomotores, Motonetas, Bicletas e Similares, 2016.
- ANFAVEA, 2016. Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/tabelas.html>>. Acesso em 10 nov. 2015.
- ANFAVEA, 2016. 2034 Uma Visão do Futuro. Disponível em: http://automotivebusiness.ananekcdn.net.br/pdf/pdf_264.pdf. Acesso em: 27 jan. 2016.
- BYD, 2014. Installation Manual and User Manual for BYD Double Glass Photovoltaic Modules.
- C40 e IDB, 2013. Low Carbon Technologies can transform Latin América's Bus Fleets. C40 Cities Climate Leader Group (C40) e Inter-American Development Bank (IDB).
- EPE, 2012. Empresa de Pesquisa Energética. Estudo Associado ao Plano Decenal de Energia – PDE 2021. Consolidação de Bases de Dados do Setor de Transporte: 1970-2010. Nota técnica SDB-Abst 1/12012, Ministério de Minas e Energia, Brasil, 2012.
- EPE, 2016a. Empresa de Pesquisa Energética. Nota Técnica DEA 13/14 : Demanda de Energia 2050. Série Estudos da Demanda de Energia. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2016.
- EPE, 2016b. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional – 2016. Ano Base 2015, Ministério de Minas e Energia, DF, Brasil, 2016.
- Façonha, C., Blumberg, K., Miller, J., 2012. Global Transportation Energy and Climate. The International Council on Clean Transportation (ICCT).
- Freitas, W.R.S. e Jabbour, C.J.C. Utilizando estudo de caso(s) como estratégia de pesquisa qualitativa: boas práticas e sugestões. Estudo&Debate, Lajeado, v.18, n.2, pp 07-22, 2011.
- Gil, Antônio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- Greenpeace International, Global Wind Energy Council e Solar Power Europe, 2015, 5th Edition 2015 World Energy Scenario.
- IBGE, 2013. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/pec/Indeco/Port/ie1-51.xlsx>> Acesso em 12 dez. 2015.
- Kirk, Jerome and Miller, Marc L.(1986) Reliability and validity in qualitative research. Beverly Hills; Sage.
- LPAA – Lima-Paris Action Agenda, 2015. Paris Declaration on Electro-Mobility and Climate Change & Call to Action, Paris.
- MCT, 2010. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2010. Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Relatórios de Referência: Emissões de Gases de Efeito Estufa no Transporte Rodoviário, Brasília 2010.

- MMA, 2011. 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF.
- MMA, 2013. Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013: Ano-base 2012, Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF.
- Nissan, 2011. Leaf - Owner Manual.
- Nissan, 2016. Disponível em: <http://www.nissan-global.com/EN/NEWS/2011/_STORY/111025-01-e.html> Acesso em: 08.jan.16.
- PNLT 2011. Plano Nacional de Logística e Transportes (2011) Projeto de Reavaliação de estimativas e Metas do PNLT. Disponível em: < <http://www.transportes.gov.br/images/2014/11/PNLT/2011.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2015.
- Schipper, L., Marie-Lilliu, C. e Gorham, R. Flexing the Link Between Transport and Greenhouse Gas Emissions: A Path for the World Bank. International Energy, Agency, 2000.
- Sims R., R. Schaeffer, F. Creutzig, X. Cruz-Núñez, M. D'Agosto, D. Dimitriu, M. J. Figueroa Meza, L. Fulton, S. Kobayashi, O. Lah, A. McKinnon, P. Newman, M. Ouyang, J. J. Schauer, D. Sperling, and G. Tiwari, 2014: Transport. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Sindipeças, 2009. Credidio, J. & Serra, B (coord). Estudo da frota circulante brasileira – Sindicato Nacional de Industria de Componentes para Veículos Automotores.
- Terberg Special Vehicles, 2016. Disponível em: <www.terbergspecialvehicles.com/products/tractors/yt-yard-tractors/yt202-ev/> Acesso em: 08.jan.16.
- UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015. Mobilise Your City Local Governments in Developing Countries Take High Road to Low-Carbon. <<http://newsroom.unfccc.int/lpaa/transport/mobiliseyourcity-taking-the-high-road-to-low-carbon/>> (acesso em 07.06.2016).
- Vanek, F.; Angenent, L.; Banks, J.; Daziano, R.; Turnquist, M. 1st Edition. Sustainable Transportation Systems Engineering: Evaluation & Implementation. Mac Graw Hill Education, 2014.
- Vaz, L. F. H.; Barros, D. C.; Castro, B. H. R. C. (2015) Veículos híbridos e elétricos: sugestões de políticas públicas para o segmento. Automotivo. BNDES Setorial, v.41, p.295-344.
- Vyas, A. D.; Patel, D. M.; Bertram, K. M. (2013). Potential for Energy Efficiency Improvement Beyond the Light-Duty-Vehicle Sector. Transportation Energy Futures Series. Prepared for the U.S. Department of Energy by Argonne National Laboratory, Argonne, IL. DOE/GO-102013-3706. 82 pp.

ANEXO 1

Tabela A1. Consolidação da venda de veículos nos Cenário de Referência e 1,5°C.

Veículos	Baseline	Ref 2050	1,5 2050
Automóveis			
dedicado à gasolina	4%	0%	0%
<i>flexible fuel</i>	95,95%	0%	0%
híbrido elétrico	0,05%	82%	40%
Elétrico a bateria	0,001%	18%	60%
Comerciais Leves			
dedicado à gasolina	8,7%	0%	0%
Ciclo Diesel	33,2%	30,3%	0%
<i>flexible fuel</i>	58%	0%	0%
Híbrido elétrico	0,1%	69,7%	20,6%
Elétrico a bateria	0%	30,3%	79,4%
Motocicletas			
elétrica	0%	35%	70%
<i>flexible fuel</i>	45%	60%	30%
Dedicada à gasolina	55%	5%	0%
Micro-ônibus urbano			
ciclo Diesel	99,9%	22%	0%
elétricos a bateria	0,1%	78%	100%
Ônibus urbano			
ciclo Diesel	99,9%	32%	0%
híbridos diesel-elétrico	0%	60%	25%
Elétrico a bateria	0,1%	8%	75%
Ônibus rodoviários (interurbanos)			
Ciclo Diesel	100%	100%	70%
Híbrido diesel – elétrico	0%	100%	30%
Caminhões semileves e leves			
ciclo Diesel	100%	100%	50%
elétrico a bateria	0%	0%	50%
Caminhões médios			
ciclo Diesel	100%	100%	20%
híbrido Diesel-elétrico	0%	0%	50%
elétrico a bateria	0%	0%	30%
Caminhões semipesados e pesados			
ciclo Diesel	100%	100%	88%
híbrido diesel-elétrico	0%	0%	12%

Tabela A2. Frota circulante por tipo de veículo e tecnologia em 2050 (Cenário Ref e 1,5°C)

Tipo de veículo	Tecnologia	REF	1,5°C
Automóvel	Dedicado à gasolina	240.515	152.765
	Dedicado a etanol	7.076	7.077
	flexible fuel	19.637.791	5.757.718
	Híbrido	43.833.723	31.383.379
	Elétrico	6.787.874	32.888.680
Comercial leve	Dedicado à gasolina	62.665	57.571
	Dedicado a etanol	624	624
	flexible fuel	3.390.871	1.526.338
	Híbrido	7.847.386	8.438.012
	Diesel	4.967.197	4.967.197
	Elétrico	-	5.957.815
Motocicleta	Dedicado à gasolina	5.917.574	3.273.134
	flexible fuel	23.062.227	4.823.625
	Elétrico	8.376.071	27.555.636
Ônibus urbano	Diesel	200.826	116.338
	Híbrido	278.700	115.107
	Elétrico	31.852	325.255
Ônibus rodoviário	Diesel	41.697	34.278
	Híbrido diesel-elétrico	-	9.074
Micro-ônibus	Diesel	34.278	25.425
	Elétrico a bateria	9.074	46.007
Caminhão semileve	Diesel	127.768	52.531
	Elétrico a bateria	-	76.402
Caminhão leve	Diesel	662.905	204.070
	Elétrico a bateria	-	286.074
Caminhão médio	Diesel	242.428	88.565
	Híbrido diesel-elétrico	-	50.843
	Elétrico a bateria	-	25.794
Caminhão semipesado	Diesel	700.275	242.897
	Híbrido diesel-elétrico	-	117.458
Caminhão pesado	Diesel	576.884	364.361
	Híbrido diesel-elétrico	-	123.438