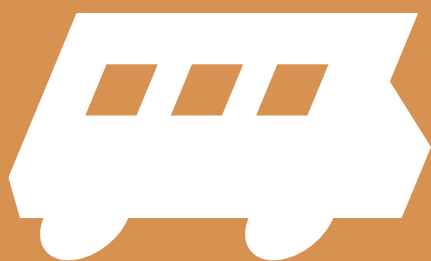




*Opções de Mitigação de Emissões
de Gases de Efeito Estufa em
Setores-Chave do Brasil*



MODELAGEM SETORIAL DE OPÇÕES DE BAIXO CARBONO PARA O SETOR DE TRANSPORTES

RÉGIS RATHMANN
(ORGANIZADOR)

MODELAGEM SETORIAL DE OPÇÕES DE BAIXO CARBONO PARA O SETOR DE TRANSPORTES

Brasília
Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
ONU Meio Ambiente
2017

M689 Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de transportes / organizador Régis Rathmann. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, ONU Meio Ambiente, 2017.

458 p.: il. – (Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil)

ISBN: 978-85-88063-39-6

1. Mudanças Climáticas. 2. Emissão de gases. 3. Transportes. 4. Efeito estufa. 5. Setor de transportes – Tecnologia. 6. Políticas públicas – Emissão de gases. I. Rathmann, Régis. II. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. III. ONU Meio Ambiente. IV. Série.

CDU 551.583

Ficha catalográfica elaborada por: Lorena Nelza F. Silva – CRB-1/2474

Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e
Comunicações
Esplanada dos Ministérios, Bloco E
CEP: 70.067-900 – Brasília – DF
Tel.: +55 (61) 2033-7500
www.mcti.gov.br

ONU Meio Ambiente – Programa das Nações Unidas
para o Meio Ambiente
Casa da ONU – Complexo Sérgio Vieira de Mello
Setor de Embaixadas Norte, Quadra 802, Conjunto C,
Lote 17
CEP 70800-400 – Brasília/DF
Tel.: +55 (61) 3038-9233
web.unep.org/regions/brazil

República Federativa do Brasil

Presidente da República

Michel Temer

Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

Gilberto Kassab

Secretário Executivo

Elton Santa Fé Zacarias

Secretário de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento

Jailson Bittencourt de Andrade

Diretor do Departamento de Políticas e Programas de Ciências

Sávio Túlio Oselieri Raeder

Coordenador-Geral do Clima

Márcio Rojas da Cruz

Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – ONU Meio Ambiente

Diretor Executivo da ONU Meio Ambiente

Erik Solheim

Diretor Regional da ONU Meio Ambiente para América Latina e Caribe

Leo Heileman

Representante da ONU Meio Ambiente no Brasil

Denise Hamú

EQUIPE TÉCNICA DO MCTIC

Coordenador-Geral do Clima

Márcio Rojas da Cruz

Diretor Nacional do Projeto Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Setores-Chave do Brasil

Ricardo Vieira Araujo

Coordenador do Projeto Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Setores-Chave do Brasil

Antônio Marcos Mendonça

Coordenador Técnico do Projeto Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Setores-Chave do Brasil

Régis Rathmann

EQUIPE TÉCNICA

Andréa Nascimento de Araújo

Lidiane Rocha de Oliveira Melo

Marcela Cristina Rosas Aboim Raposo

Moema Vieira Gomes Corrêa (Diretora Nacional do Projeto até outubro de 2016)

Rodrigo Henrique Macedo Braga

Sonia Regina Mudrovitsch de Bittencourt

Susanna Erica Busch

EQUIPE ADMINISTRATIVA

Ana Carolina Pinheiro da Silva

Andréa Roberta dos Santos Campos

Maria do Socorro da Silva Lima

Ricardo Morão Alves da Costa

EQUIPE TÉCNICA DA ONU MEIO AMBIENTE

Francine Costa Vaurof

Patricia Taboada

Guilherme Sattamini

Maria Claudia Cambraia

AUTORES E COLABORADORES

Bruno Soares Moreira Cesar Borba (Coordenador)

Alexandre de Arruda Bitencourt

Ana Luiza Andrade

Annelys Machado Schetinger

Bernardo Vianna Zurli Machado

Bruno Scola Lopes da Cunha

Daniel Henrique Nogueira Dias

Emanuel Cella Simon

Leonardo de Arruda Bitencourt

Monica Chagas

Raphael Benirschke Terra

Victor César Maia

Revisão

Anna Cristina de Araújo Rodrigues

Projeto Gráfico

Capitular Design Editorial

Editoração e diagramação

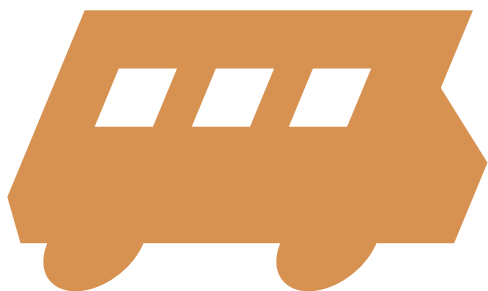
Phábrica de Produções:

Alecsander Coelho, Daniela Bissiguini,

Ércio Ribeiro, Icaro Bockmann, Marcel Casagrande,

Marcelo Macedo, Paulo Ciola, Kauê Rodrigues

e Rodrigo Alves



Sumário

INTRODUÇÃO	43
1 O SETOR DE TRANSPORTES NO BRASIL	49
1.1 PANORAMA GERAL DO SETOR DE TRANSPORTES NO BRASIL	49
1.2 MODAL RODOVIÁRIO	55
1.2.1 Transporte de passageiros.....	56
1.2.2 Transporte de carga.....	67
1.3 MODAL FERROVIÁRIO	77
1.3.1 Transporte de passageiros.....	80
1.3.2 Transporte de carga.....	85
1.4 MODAL AÉREO	88
1.4.1 Transporte de passageiros.....	91
1.4.2 Transporte de carga.....	95
1.5 MODAL HIDROVIÁRIO	98
1.5.1 Transporte de passageiros.....	102
1.5.2 Transporte de carga.....	106
2 EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DO SETOR DE TRANSPORTES.....	111

3 DESCRIÇÃO DAS MELHORES TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS, SUBSTITUIÇÃO MODAL E ASPECTOS COMPORTAMENTAIS NO SETOR DE TRANSPORTES.....	119
3.1 TECNOLOGIA VEICULAR INCREMENTAL.....	119
3.1.1 Veículos automotivos	119
3.1.1.1 Aerodinâmica	124
3.1.1.2 Redução de massa	127
3.1.1.3 Pneus e rodas.....	131
3.1.1.4 Motor.....	133
3.1.1.5 Transmissão e sistema de tração	138
3.1.1.6 Híbridização.....	139
3.1.1.7 Sistemas inteligentes	140
3.1.1.8 Síntese	141
3.1.2 Embarcações.....	143
3.1.2.1 Hidro e aerodinâmica.....	144
3.1.2.2 Sistema de propulsão.....	146
3.1.2.3 Melhoria da concepção energética	151
3.1.2.4 Síntese.....	152
3.1.3 Aeronaves	153
3.1.3.1 Aerodinâmica.....	153
3.1.3.2 Redução de massa	153
3.1.3.3 Motor.....	154
3.1.3.4 Síntese.....	155
3.1.4 Trens.....	155
3.1.4.1 Aerodinâmica.....	155
3.1.4.2 Redução de massa.....	156
3.1.4.3 Empilhamento de contêineres	156
3.1.4.4 Automação, operação da frota e frenagem.....	156
3.1.4.5 Locomotivas a diesel e elétricas	157

3.2 TECNOLOGIA VEICULAR AVANÇADA	157
3.2.1 Veículos automotivos	157
3.2.1.1 Veículos elétricos a bateria	157
3.2.1.2 Veículos a célula a combustível	162
3.2.2 Embarcações.....	168
3.2.3 Trens	169
3.2.3.1 Levitação eletromagnética (EML)	170
3.2.3.2 Levitação eletrodinâmica (EDL).....	171
3.2.3.3 Levitação supercondutora (SML).....	172
3.3 ASPECTOS COMPORTAMENTAIS	173
3.4 MUDANÇAS DE MODAL	175
3.4.1 Transporte de passageiros	175
3.4.1.1 Bus rapid transit (BRT).....	175
3.4.1.2 Veículos leves sobre trilhos (VLT)	176
3.4.1.3 Metrô.....	178
3.4.1.4 Trem de alta velocidade (TAV).....	179
3.4.1.5 Transporte não motorizado	180
3.4.2 Transporte de carga	181
3.5 OUTRAS MEDIDAS.....	185
3.5.1 Melhorias de infraestrutura.....	185
3.5.2 Biocombustíveis	188
3.5.3 Medidas operacionais.....	190
3.5.3.1 Embarcações.....	190
3.5.3.2 Aeronaves.....	191
4 METODOLOGIA PARA PROJEÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE GEE DO SETOR DE TRANSPORTES.....	195
4.1 MODAL RODOVIÁRIO.....	196
4.1.1 Transporte de passageiros.....	198
4.1.2 Transporte de carga.....	200

4.2 MODAL FERROVIÁRIO	202
4.2.1 Transporte de passageiros	202
4.2.2 Transporte de carga	202
4.3 MODAL AÉREO.....	203
4.3.1 Transporte de passageiros	203
4.3.2 Transporte de carga	205
4.4 MODAL HIDROVIÁRIO	206
4.4.1 Transporte de passageiros	206
4.4.2 Transporte de carga	206
5 CENÁRIO DE REFERÊNCIA	209
5.1 MODAL RODOVIÁRIO	211
5.1.1 Transporte de passageiros.....	211
5.1.1.1 Evolução da frota de veículos	211
5.1.1.2 Evolução da intensidade de uso.....	216
5.1.1.3 Evolução do consumo específico	218
5.1.1.4 Evolução do fator de ocupação	218
5.1.2 Transporte de carga.....	219
5.1.2.1 Evolução da frota de veículos.....	219
5.1.2.2 Evolução da intensidade de uso	222
5.1.2.3 Evolução do consumo específico	224
5.1.2.4 Evolução do fator de ocupação.....	225
5.2 MODAL FERROVIÁRIO.....	226
5.2.1 Transporte de passageiros	226
5.2.1.1 Evolução do número de passageiros-quilômetro	226
5.2.1.2 Evolução do consumo específico	226
5.2.2.1 Evolução da frota de vagões.....	228

5.2.2.2	Evolução da intensidade de uso.....	228
5.2.2.3	Evolução do fator de ocupação.....	229
5.2.2.4	Evolução do consumo específico.....	230
5.3	MODAL AÉREO.....	231
5.3.1	Transporte de passageiros.....	231
5.3.1.1	Evolução do fator de ocupação	231
5.3.1.2	Evolução do consumo específico	232
5.3.1.3	Evolução do número de assentos-quilômetro	232
5.3.2	Transporte de carga	233
5.3.2.1	Evolução do consumo específico	233
5.3.2.2	Evolução do nível de atividade	233
5.4	MODAL HIDROVIÁRIO.....	234
5.4.1	Transporte de passageiros	234
5.4.1.1	Evolução do número de passageiros transportados.....	234
5.4.1.2	Evolução da intensidade de uso	235
5.4.1.3	Evolução do consumo específico	235
5.4.2	Transporte de carga	237
5.4.2.1	Evolução da carga transportada	239
5.4.2.2	Evolução da intensidade de uso.....	242
5.4.2.3	Evolução do consumo específico.....	242
5.5	PROJEÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE GEE	244
5.5.1	Transporte de passageiros.....	247
5.5.2	Transporte de carga.....	248
6	CENÁRIO DE BAIXO CARBONO	251
6.1	MODAL RODOVIÁRIO	252
6.1.1	Transporte de passageiros.....	252

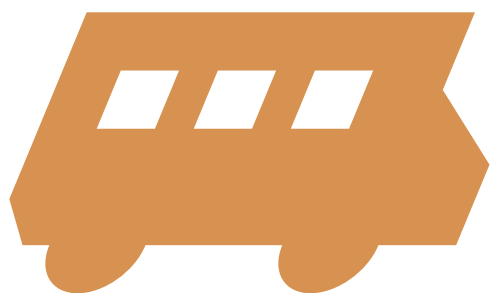
6.1.1.1 Evolução da frota de veículos.....	253
6.1.1.2 Evolução da intensidade de uso	254
6.1.1.3 Evolução do consumo específico	254
6.1.1.4 Evolução do fator de ocupação	255
6.1.1.5 Custos e potencial de economia	255
6.1.2 Transporte de carga.....	257
6.1.2.1 Evolução da frota de veículos	258
6.1.2.2 Evolução da intensidade de uso	259
6.1.2.3 Evolução do consumo específico	259
6.1.2.4 Evolução do fator de ocupação	263
6.1.2.5 Custos e potencial de economia	263
6.2 MODAL FERROVIÁRIO.....	264
6.2.1 Transporte de passageiros	264
6.2.1.1 Evolução do número de passageiros-quilômetro	264
6.2.1.2 Evolução do consumo específico	264
6.2.2 Transporte de carga	264
6.2.2.1 Evolução da frota de vagões.....	264
6.2.2.2 Evolução da intensidade de uso.....	265
6.2.2.3 Evolução do fator de ocupação.....	266
6.2.2.4 Evolução do consumo específico	266
6.2.2.5 Custos e potencial de economia	267
6.3 MODAL AÉREO.....	268
6.3.1 Transporte de passageiros	268
6.3.1.1 Evolução do fator de ocupação	268
6.3.1.2 Evolução do consumo específico	268
6.3.1.3 Evolução do número de assentos-quilômetros	269
6.3.2 Transporte de carga	269

6.3.2.1	Evolução do consumo específico	269
6.3.2.2	Evolução do nível de atividade	269
6.4	MODAL HIDROVIÁRIO	270
6.4.1	Transporte de passageiros	270
6.4.1.1	Evolução do número de passageiros transportados.....	270
6.4.1.2	Evolução da intensidade de uso	270
6.4.1.3	Evolução do consumo específico.....	270
6.4.1.4	CUSTOS E POTENCIAL DE ECONOMIA	272
6.4.2	Transporte de carga	274
6.4.2.1	Evolução da carga transportada	274
6.4.2.2	Evolução da intensidade de uso.....	274
6.4.2.3	Evolução do consumo específico	274
6.4.2.4	Custos e potencial de economia.....	277
6.4.2.5	Mudança de modal e custos em infraestrutura necessários.....	278
6.5	PROJEÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE GEE	278
6.5.1	Transporte de passageiros.....	281
6.5.2	Transporte de carga	282
6.6	CUSTO MARGINAL DE ABATIMENTO.....	283
6.6.1	Aspectos teóricos.....	284
6.6.2	Potenciais e custos marginais de abatimento do cenário de baixo carbono...285	
7	CENÁRIO DE BAIXO CARBONO COM INOVAÇÃO	291
7.1	TECNOLOGIAS INOVADORAS NO SETOR DE TRANSPORTES	292
7.1.1	Veículos a célula a combustível	292
7.1.2	Ônibus a etanol.....	295
7.1.3	Embarcações com <i>towing kite</i>	299
7.1.4	Veículo híbrido hidráulico.....	302
7.1.4.1	Componentes do sistema	307

7.1.5 Sistema de levitação magnética	310
7.15.1 Levitação eletromagnética (EML).....	312
7.1.5.2 Levitação eletrodinâmica.....	314
7.1.5.3 Levitação supercondutora	314
7.1.6 Avião solar	316
7.1.6.1 Componentes do sistema.....	319
7.2.1 Transporte de passageiros	323
7.2.2 Transporte de carga	324
7.4 PREMISSAS DO MODAL FERROVIÁRIO	325
7.4.1 Transporte de passageiros.....	325
7.5.1 Transporte de carga	326
7.5 PREMISSAS DO MODAL AÉREO	326
7.5.1 Transporte de passageiros.....	326
7.5.2 Transporte de carga	327
7.6 PREMISSAS DO MODAL HIDROVIÁRIO	327
7.6.1 Transporte de passageiros.....	327
7.6.2 Transporte de carga	327
7.7 PROJEÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE GEE	327
7.7.1 Transporte de passageiros.....	330
7.7.2 Transporte de carga	331
8 SUBSÍDIOS PARA A FORMULAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE POLÍTICA PÚBLICA COM VISTAS AO ABATIMENTO DE EMISSÕES DE GEE PELO SETOR DE TRANSPORTES	333
8.1 COBENEFÍCIOS, BARREIRAS E AS EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS E NACIONAL NA ADOÇÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS DE BAIXO CARBONO PARA O SETOR DE TRANSPORTES.....	335
8.1.1 Cobenefícios, barreiras e as experiências internacionais e nacional associada a políticas de eficiência energética.....	335
8.1.1.1 Medidas informacionais	338
8.1.1.2 Padrões de eficiência veicular	339

8.1.1.3 Medidas fiscais	341
8.1.1.4 Experiências internacionais.....	343
8.1.1.5 Experiência nacional.....	354
8.1.1.6 Comparação entre países	361
8.1.1.7 Síntese das barreiras e dos cobenefícios associados à adoção de políticas visando à eficiência energética no setor de transportes	363
8.1.2 Cobenefícios, barreiras e as experiências internacionais e nacional associadas a políticas de mudança modal	365
8.1.2.1 Mobilidade urbana.....	366
8.1.2.1.1 Experiências internacionais.....	367
8.1.2.1.2 Experiência nacional.....	372
8.1.2.2 Infraestrutura para transporte de carga	377
8.1.2.2.1 Experiências internacionais.....	378
8.1.2.2.2 Experiência nacional	381
8.1.3 Cobenefícios, barreiras e as experiências internacionais e nacional associadas a políticas de biocombustíveis.....	390
8.1.3.1 Etanol	390
8.1.3.2 Biodiesel	392
8.1.3.3 Biojet.....	392
8.1.3.4 Síntese das barreiras e dos cobenefícios associados à adoção de políticas de biocombustíveis no setor de transportes	393
8.2 SUBSÍDIOS PARA A FORMULAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE POLÍTICAS PÚBLICAS VISANDO À ADOÇÃO DAS ATIVIDADES DE BAIXO CARBONO NO SETOR DE TRANSPORTES	393
8.2.1 Eficiência energética.....	394
8.2.1.1 Modais convencionais: carros, ônibus, caminhões, trens, embarcações e aeronaves	394
8.2.1.2 Novas tecnologias	397
8.2.2 Mudança modal.....	400
8.2.2.1 Mobilidade urbana	400
8.2.2.2 Outros modais	403

8.2.3 Biocombustível	406
8.3 SÍNTESE DOS SUBSÍDIOS PARA A FORMULAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE POLÍTICAS PÚBLICAS VISANDO À ADOÇÃO DAS ATIVIDADES DE BAIXO CARBONO NO SETOR DE TRANSPORTES..	408
CONSIDERAÇÕES FINAIS	411
REFERÊNCIAS.....	421
ANEXO – TAXA DE CRESCIMENTO DAS MERCADORIAS TRANSPORTADAS	453



Listas de tabelas,
figuras, quadros e
siglas e acrônimos

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo Final de Energia no Setor de Transportes Nacional por Modal	51
Tabela 2 – Investimentos em Infraestrutura de Transportes no Brasil – PIL	55
Tabela 3 – Extensão da Rede Rodoviária – Brasil.....	55
Tabela 4 – Curvas de Sucateamento por Categoria de Veículos – Transporte de Passageiros.....	60
Tabela 5 – Frota Veicular Rodoviária – Transporte de Passageiros	61
Tabela 6 – Quilometragem Média Percorrida por Veículo ao Ano	66
Tabela 7 – Consumo de Combustível no Transporte de Passageiros	66
Tabela 8 – Frota Veicular Rodoviária – Transporte de Carga	68
Tabela 9 – Vendas de Veículos – Transporte de Carga	69
Tabela 10 – Curvas de Sucateamento por Categoria de Veículos – Transporte de Carga	69
Tabela 11 – Idade Média dos Veículos de Transporte de Carga no Brasil.....	70
Tabela 12 – Quilometragem Média Percorrida por Veículo ao Ano	72
Tabela 13 – Distância Média Percorrida pelos Caminhoneiros em Julho de 2011.....	72
Tabela 14 – Velocidade Média Predominante em Julho de 2011.....	73
Tabela 15 – Quilometragem por Litro e Consumo Específico de Diesel por Categoria de Veículo	73

Tabela 16 – Consumo Anual de Óleo Diesel por Tipo de Veículo (em mil m ³)	74
Tabela 17 – Carga Média (em Toneladas) Transportada por Veículo por Categoria e Faixa de Idade	75
Tabela 18 – Carga Transportada pelo Modal Rodoviário	75
Tabela 19 – Produtos Transportados no Modal Rodoviário.....	76
Tabela 20 – Extensão da Malha Ferroviária Nacional Concedida	79
Tabela 21 – Levantamento das Principais Obras do Eixo Ferroviário do PAC.....	80
Tabela 22 – Ferrovias Disponíveis para o Transporte de Passageiros.....	81
Tabela 23 – Número de Passageiros Transportados (Milhões).....	81
Tabela 24 – Trechos com Potencial de Transporte de Passageiros por Região.....	82
Tabela 25 – Carga Transportada por Concessionária em 2013.....	86
Tabela 26 – Consumo de Óleo Diesel Estimado por Concessionário para 2012.....	87
Tabela 27 – Total de Mercadorias Transportadas pelo Modal Ferroviário em 2012	88
Tabela 28 – Movimentação de Cargas por Modal no Brasil.....	97
Tabela 29 – Tarifas do Transporte Hidroviário no Rio de Janeiro.....	105
Tabela 30 – Emissões Totais de CO ₂ por Combustível.....	112
Tabela 31 – Emissões Totais de CO ₂ por Modal	112
Tabela 32 – Fatores de Emissão de CH ₄ e N ₂ O.....	114
Tabela 33 – Emissões Totais de CH ₄ por Combustível.....	115
Tabela 34 – Emissões Totais de N ₂ O por Combustível	115
Tabela 35 – Emissões de CH ₄ e N ₂ O em CO ₂ eq por Modal.....	116
Tabela 36 – Emissões Totais de GEE por Modal.....	117

Tabela 37 – Ganhos de Eficiência Aerodinâmica dos Veículos Pesados (%).....	127
Tabela 38 – Ganhos de Eficiência e Custos das Tecnologias Incrementais nos Veículos Leves	141
Tabela 39 – Ganhos de Eficiência e Custos das Tecnologias Incrementais nos Caminhões	142
Tabela 40 – Ganhos de Eficiência e Custos das Tecnologias Incrementais nos Ônibus	142
Tabela 41 – Custos das Diferentes Pinturas Especiais no Casco.....	145
Tabela 42 – Ganhos de Eficiência e Custos do Sistema de Injeção de Ar no Casco.....	145
Tabela 43 – Custos da Instalação de Rebordos ou Grades.....	146
Tabela 44 – Custos da Instalação de Piloto Automático	146
Tabela 45 – Custos das Tecnologias de Hélice <i>Tip Winglets</i> ou <i>Nozzles</i>	147
Tabela 46 – Custos da Tecnologia de Hélice <i>Boss Cap With Fins</i>	148
Tabela 47 – Custos do Propulsor Integrado ao Leme.....	149
Tabela 48 – Custos da Tecnologia <i>Common Rail</i>	150
Tabela 49 – Custos do Sistema de Ajuste da Injeção do Motor	150
Tabela 50 – Custos do Sistema de Monitoramento da Eficiência da Hélice	151
Tabela 51 – Custos do Sistema de Cogeração de Energia	151
Tabela 52 – Custos do Controle de Velocidade de Bombas e Ventiladores.....	152
Tabela 53 – Ganhos de Eficiência e Custos das Tecnologias Incrementais nas Embarcações.....	152
Tabela 54 – Ganhos de Eficiência e Custos das Tecnologias Incrementais nas Aeronaves.....	155
Tabela 55 – Principais VEB e Híbridos <i>Plug-in</i> Comercializados	159
Tabela 56 – Características dos Principais Tipos de Baterias	161

Tabela 57 – Valores Médios dos Veículos Elétricos por Tipo de Bateria	162
Tabela 58 – Comparação Técnico-Econômica entre as PEMFC e Seus Concorrentes para Propulsão	164
Tabela 59 – Principais Protótipos de Veículos a Célula a Combustível.....	166
Tabela 60 – Ganhos de Eficiência e Custos do Sistema <i>Towing Kite</i>	168
Tabela 61 – Ganhos de Eficiência e Custos das Tecnologias Avançadas por Embarcação Típica	169
Tabela 62 – Características do Transporte por BRT.....	176
Tabela 63 – Características do Transporte por VLT.....	177
Tabela 64 – Características do Transporte por Metrô.....	179
Tabela 65 – Comparação de Custos em Reais por Tonelada Transportada	182
Tabela 66 – Participações Previstas pelo PNLT no Transporte de Carga	185
Tabela 67 – Relação de Velocidade, Potência do Motor e Consumo de Combustível.....	191
Tabela 68 – Ganho Energético e Custos da Redução de Velocidade por Embarcação Típica	191
Tabela 69 – Classificação dos Caminhões na Metodologia do Modal Rodoviário	200
Tabela 70 – Taxa de Crescimento Médio Anual do PIB por Quinquênio	209
Tabela 71 – Dados Utilizados para Cálculo das Elasticidades.....	212
Tabela 72 – Elasticidade-venda do PIB Calculada	213
Tabela 73 – Histórico de Venda de Veículos do Transporte de Carga	219
Tabela 74 – Intensidade de Uso (Km/ano) – Veículos de Carga	223
Tabela 75 – Consumo Específico dos Veículos de Carga – 2012	224
Tabela 76 – Carga Média (em Toneladas) Transportada por Veículo de Carga	225
Tabela 77 – Evolução PKM Ferroviário.....	226

Tabela 78 – Dados de 2013 para a Metodologia do Modal Ferroviário	227
Tabela 79 – Quantidade de Vagões por Concessionária	228
Tabela 80 – Percurso Médio do Vagão (em Km) por Concessionária	229
Tabela 81 – Consumo Específico (em L/mil TKU) por Concessionária	231
Tabela 82 – Taxa de Ocupação das Aeronaves	232
Tabela 83 – Eficiência Energética das Aeronaves	232
Tabela 84 – Assentos-Quilômetro Ofertados	233
Tabela 85 – Exportações e Importações Brasileiras	233
Tabela 86 – Projeção de Passageiros Transportados no Transporte Aquaviário	235
Tabela 87 – Características do Transporte Hidroviário e Cabotagem por Grupos de Mercadorias	238
Tabela 88 – Taxas de Crescimento da Demanda para os Principais Portos Nacionais	240
Tabela 89 – Projeção do Transporte Hidroviário e Cabotagem por Grupos de Mercadorias	241
Tabela 90 – Tonelada-Quilômetro Útil do Transporte Hidroviário e Cabotagem Somente Marítima	242
Tabela 91 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Combustível (mil tep)	245
Tabela 92 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Modal (mil tep)	246
Tabela 93 – Emissão de Gases de Efeito Estufa por Modal (GgCO ₂ eq)	246
Tabela 94 – Passageiros-Quilômetro Transportados por Modal (Milhões de PKM)	247
Tabela 95 – Toneladas-Quilômetro Transportadas por Modal (Milhões de TKU)	248
Tabela 96 – Automóveis e Comerciais Leves: Potenciais de Economia de Energia e Custos Incorridos	255

Tabela 97 – Ônibus: Potenciais de Economia de Energia e Custos Incorridos.....	256
Tabela 98 – Custos Médios dos Veículos Rodoviários de Transporte de Passageiros.....	257
Tabela 99 – Proporção de Mudança Modal no Transporte de Carga (por Produto)	258
Tabela 100 – Pacote Tecnológico	261
Tabela 101 – Penetrabilidade Tecnológica	262
Tabela 102 – Custo de Cada Pacote Tecnológico	263
Tabela 103 – Evolução pkm Ferroviário – Cenários REF e BC.....	264
Tabela 104 – Mudança Modal – Migração para o Ferroviário (10 ⁶ TKU)	265
Tabela 105 – Quantidade de Vagões por Concessionária – Baixo Carbono.....	265
Tabela 106 – Consumo Específico (em L/mil TKU) por Concessionária....	267
Tabela 107 – Custo Total (US\$/2011) para a Implementação do Pacote de Tecnologias	268
Tabela 108 – Eficiência Energética das Aeronaves (litros/ASK) – Cenários REF e BC	269
Tabela 109 – Estimativa da Relação das Novas Embarcações perante o Total	272
Tabela 110 – Redução Média do Consumo Específico devido às Ações de Eficiência Energética	272
Tabela 111 – Ganhos de Eficiência e Custos das Tecnologias nas Embarcações de Passageiros.....	273
Tabela 112 – Contribuição dos Ganhos Energéticos das Tecnologias nas Embarcações de Passageiros.....	273
Tabela 113 – Ganhos e Custos Acumulados por Período Ocasionalmente por Ações de Eficiência Energética nas Embarcações de Passageiros Existentes e Novas.....	273
Tabela 114 – Redução Média do Consumo Específico devido às Ações de Eficiência Energética nas Embarcações de Carga	276

Tabela 115 – Contribuição dos Ganhos Energéticos das Tecnologias nas Embarcações de Cargas.....	277
Tabela 116 – Ganhos e Custos Acumulados por Período Ocasionados por Ações de Eficiência Energética nas Embarcações de Cargas Existentes e Novas.....	277
Tabela 117 – Mudança de Modal do Transporte Rodoviário para o Hidroviário	278
Tabela 118 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Combustível (mil tep) – Baixo Carbono	279
Tabela 119 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Modal (mil tep) – Baixo Carbono	280
Tabela 120 – Emissão de Gases de Efeito Estufa por Modal (GgCO ₂ eq) – Baixo Carbono	281
Tabela 121 – Passageiros-Quilômetro Transportados por Modal (Milhões de PKM) – Baixo Carbono.....	282
Tabela 122 – Toneladas-Quilômetro Transportadas por Modal (Milhões de TKU) – Baixo Carbono	283
Tabela 123 – Custos Marginais de Abatimento para o Setor de Transportes – Cenário de Baixo Carbono	286
Tabela 124 – Modelo de Motor Ciclo Diesel Movido a Etanol Scania Nacional	297
Tabela 125 – Propriedades Físico-Químicas dos Combustíveis (1 atm e 288 K)	298
Tabela 126 – Custos do Sistema <i>Towing Kite</i>	302
Tabela 127 – Evolução PKM Ferroviário nos Cenários BC e BC+I	326
Tabela 128 – Redução PKM Aéreo do Cenário BC em Relação ao Cenário BC+I.....	326
Tabela 129 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Combustível (mil tep)	328
Tabela 130 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Modal (mil tep).....	329

Tabela 131 – Emissão de Gases de Efeito Estufa por Modal (GgCO ₂ eq).....	330
Tabela 132 – Medidas, Potenciais e Custos de Abatimento no Setor de Transportes.....	334
Tabela 133 – Multa em Função da Eficiência do Veículo.....	360
Tabela 134 – Taxa de Crescimento Médio Anual do Valor Bruto de Produção das Mercadorias Transportadas.....	453

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Posse de Veículos por Habitante em Função da Renda <i>Per Capita</i>	43
Figura 2 – Distribuição do Consumo Final de Energia no Setor de Transportes – Mundo	44
Figura 3 – Emissões Diretas de GEE pelo Setor de Transportes – Mundo.....	45
Figura 4 – Distribuição Modal da Matriz Brasileira de Transportes de Carga.....	50
Figura 5 – Distribuição Modal da Matriz Brasileira de Transportes de Passageiros.....	50
Figura 6 – Distribuição dos Combustíveis Consumidos no Setor de Transportes	52
Figura 7 – Densidade de Infraestrutura de Transportes em Países Selecionados	53
Figura 8 – Evolução do Investimento Federal em Infraestrutura de Transporte (Investimento/PIB)	54
Figura 9 – Condições de Pavimentação da Malha Rodoviária	56
Figura 10 – Estados com Maior Demanda de Transporte Interestadual Rodoviário	57
Figura 11 – Mobilidade Urbana e Distribuição Modal – Cidades com Mais de 60 Mil Habitantes.....	58
Figura 12 – Licenciamento de Autoveículos Novos por Categoria – Transporte de Passageiros	59
Figura 13 – Curva de Sucateamento de Autoveículos no Transporte de Passageiros	60
Figura 14 – Taxa de Motorização (Veículos por 100 Habitantes).....	62
Figura 15 – Idade Média da Frota em 2012 – Transporte de Passageiros	63
Figura 16 – Posse de Automóveis e/ou Motocicleta por Unidade Federativa	64

Figura 17 – Intensidade de Uso – Transporte de Passageiros	65
Figura 18 – Curvas de Sucateamento – Transporte de Carga	69
Figura 19 – Distribuição da Frota por Idade.....	70
Figura 20 – Intensidade de Uso – Transporte de Carga	72
Figura 21 – Malha Ferroviária no Brasil	78
Figura 22 – Traçado do Trem de Alta Velocidade	83
Figura 23 – Número de Passageiros Transportados em 2012 (Milhões)	84
Figura 24 – Potencial de Expansão do Transporte de Passageiros sobre Trilhos	84
Figura 25 – Carga Transportada por Concessionária	86
Figura 26 – Quantidade de Locomotivas e Vagões Totais Operando no Modal Ferroviário de Carga	87
Figura 27 – Evolução do Consumo de Querosene de Aviação	90
Figura 28 – Ganhos em Eficiência Tecnológica no Transporte Aéreo de Passageiros.....	90
Figura 29 – Passageiros-Quilômetro Transportados (RPK) no Brasil por Segmento	92
Figura 30 – Evolução da Tarifa Média Doméstica e do <i>Yield</i> Médio Doméstico	93
Figura 31 – Evolução da Taxa de Ocupação dos Voos	94
Figura 32 – Passageiros Transportados no Brasil por Modal em Longa Distância.....	95
Figura 33 – Carga Aérea Transportada em Voos Regulares	96
Figura 34 – Carga Aérea Transportada Via Terminais Logísticos	96
Figura 35 – Evolução do Transporte de Carga	97
Figura 36 – Consumo de Óleo Diesel e Óleo Combustível no Segmento Hidroviário	98
Figura 37 – Principais Estados Compradores de Óleo Diesel Marítimo	99

Figura 38 – Portos de Navegação de Cabotagem	100
Figura 39 – Quantidade e TPB por Tipo de Embarcações no Transporte de Cabotagem	101
Figura 40 – Abrangência do Estudo do Transporte Hidroviário na Amazônia	102
Figura 41 – Cinco Maiores Linhas de Movimentação de Passageiros na Amazônia	103
Figura 42 – Movimentação de Passageiros por Hidrovias na Região Metropolitana do RJ	104
Figura 43 – Quantidade de Passageiros do Transporte Hidroviário Brasileiro em 2012.....	105
Figura 44 – Passageiros-Quilômetro do Transporte Hidroviário Brasileiro em 2012	106
Figura 45 – Carga Útil Transportada e Tonelada-Quilômetro Útil em Hidrovias Interiores no Brasil	107
Figura 46 – Distribuição do Transporte Hidroviário Interior em 2012 em Toneladas e TKU.....	107
Figura 47 – Participação dos Principais Grupos de Mercadorias em Tonelada-Quilômetro Útil e Carga Útil Transportada em 2012 no Transporte de Cabotagem	108
Figura 48 – Carga Útil Transportada e Tonelada-Quilômetro Útil em Todas as Hidrovias do Brasil.....	109
Figura 49 – Distribuição das Principais Cargas Transportadas nas Hidrovias (TKU).....	109
Figura 50 – Distribuição das Emissões de CO ₂ do Modal Rodoviário – 2012.....	113
Figura 51 – Perdas de Energia nos Veículos Leves.....	120
Figura 52 – Perdas de Energia nos Veículos Pesados	121
Figura 53 – Relação entre Velocidade do Veículo e as Resistências Aerodinâmica e de Rolagem	122

Figura 54 – Efeito da Calibragem dos Pneus no Consumo de Combustível.....	123
Figura 55 – Coeficiente de Arrasto para Diferentes Tipos de Veículos	124
Figura 56 – Distribuição do Vento nos Veículos Leves.....	125
Figura 57 – Distribuição do Vento nos Veículos Pesados	126
Figura 58 – Redução do Coeficiente de Arrasto dos Caminhões	126
Figura 59 – Relação entre Consumo de Combustível e Peso dos Veículos Leves e Pesados	128
Figura 60 – Distribuição do Peso dos Veículos Leves.....	128
Figura 61 – Distribuição do Peso dos Veículos Semipesados e Pesados.....	130
Figura 62 – Pneu de Base Larga	132
Figura 63 – Evolução da Eficiência de Motores Diesel e Influência da Regulação de NOx na Europa	135
Figura 64 – Porte Médio por Tipo de Embarcação da Cabotagem e Navegação Interior	144
Figura 65 – Instalação de Rebordos.....	145
Figura 66 – Hélice do Tipo <i>Tip Winglets</i>	147
Figura 67 – Hélice do Tipo <i>Nozzles</i>	147
Figura 68 – Hélice do Tipo <i>Boss Cap With Fins</i>	148
Figura 69 – Sistema de Propulsão Integrado ao Leme	149
Figura 70 – Funcionamento Básico de uma Célula a Combustível.....	163
Figura 71 – Embarcação Provida de <i>Towing Kite</i>	168
Figura 72 – Ilustração de uma Embarcação Provida de Rotores Flettner	169
Figura 73 – Componentes do Sistema de Tração e Levitação do EML.....	170
Figura 74 – Trem com Tecnologia EML em Operação – China	171
Figura 75 – Topologia da Tecnologia de Levitação EDL.....	171

Figura 76 – Trem de Levitação Eletrodinâmica – Japão	172
Figura 77 – Linha Teste do Trem de Levitação Supercondutora – Brasil	173
Figura 78 – Exemplo de Sistema BRT	175
Figura 79 – Exemplo de Sistema VLT	177
Figura 80 – Exemplo de Sistema de Metrô.....	178
Figura 81 – Exemplo de TAV	180
Figura 82 – Exemplo de Transporte Não Motorizado com Uso de Bicicletas.....	183
Figura 83 – Equivalência de Capacidade de Carga Transportada entre os Modais.....	183
Figura 84 – Consumo de Combustível por 1.000 Toneladas-Quilômetro Útil Transportadas	184
Figura 85 – Ilustração do Sistema AERIS.....	186
Figura 86 – Impacto da Velocidade do Veículo na Emissão de CO ₂	187
Figura 87 – Variação do Ciclo de Vida dos Gases de Efeito Estufa entre Diferentes Biocombustíveis.....	189
Figura 88 – Metodologia para a Projeção do Consumo no Transporte de Carga Rodoviário.....	201
Figura 89 – Metodologia para a Projeção do TKU no Transporte de Carga Ferroviário	202
Figura 90 – Metodologia para a Projeção do Consumo no Transporte de Carga Ferroviário.....	203
Figura 91 – Metodologia para a Projeção dos Emissões no Transporte de Carga Ferroviário	203
Figura 92 – Crescimento da População Brasileira entre 2012 e 2050	210
Figura 93 – Curva de Sucateamento de Autoveículos no Transporte de Passageiros.....	214

Figura 94 – Evolução da Frota Circulante.....	215
Figura 95 – Frota Circulante por Tipo de Combustível.....	216
Figura 96 – Intensidade de Uso – Transporte de Passageiros	217
Figura 97 – Vendas de Veículos – Transporte de Carga.....	221
Figura 98 – Curva de Sucateamento de Autoveículos no Transporte de Carga.....	221
Figura 99 – Frota de Veículos de Carga.....	222
Figura 100 – Projeção do Consumo Específico dos Veículos Pesados	224
Figura 101 – Toneladas Médias Transportadas por Veículos	225
Figura 102 – Crescimento Populacional da Região Norte e do Estado do Rio de Janeiro	234
Figura 103 – Consumo de Óleo Diesel e Óleo Combustível no Segmento Hidroviário.....	236
Figura 104 – Consumos Específicos de Óleo Diesel no Transporte Aquaviário de Passageiros	237
Figura 105 – Bilhões de Toneladas-Quilômetro Útil no Transporte Aquaviário.....	243
Figura 106 – Consumo Específico de Óleo Diesel e Combustível no Transporte Aquaviário de Cargas	243
Figura 107 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Combustível	245
Figura 108 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Modal ..	246
Figura 109 – Distribuição Modal do Transporte de Passageiros – 2050 ..	248
Figura 110 – Distribuição Modal do Transporte de Carga – 2050	249
Figura 111 – Evolução da Frota Circulante dos Automóveis (Milhões de Veículos) – Cenários de Referência e Baixo Carbono.....	253
Figura 112 – Vendas de Veículos – Transporte de Carga – Baixo Carbono.....	258
Figura 113 – Frota de Veículos de Carga – Baixo Carbono.....	259

Figura 114 – Projeção Consumo Específico dos Veículos Pesados.....	262
Figura 115 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Combustível.....	279
Figura 116 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Modal.....	280
Figura 117 – Emissão de Gases de Efeito Estufa por Modal.....	281
Figura 118 – Distribuição Modal do Transporte de Passageiros.....	282
Figura 119 – Distribuição Modal do Transporte de Carga	283
Figura 120 – Curva de Custo Marginal de Abatimento – 2050	288
Figura 121 – Eficiência Exergética dos Principais Conversores de Energia ...	293
Figura 122 – Ciclos do Motor de Ignição por Compressão de 4 Tempos	295
Figura 123 – Modelo de Motor de Ignição por Compressão Movido a Etanol.....	296
Figura 124 – Ônibus Urbano Movido a Etanol em Estocolmo (Suécia).....	299
Figura 125 – Componentes do Sistema de <i>Towing Kite</i>	300
Figura 126 – Trajetória Dinâmica da Pipa para Propulsão.....	301
Figura 127 – Primeiro UPS com a Tecnologia Híbrida Hidráulica do Mundo.....	303
Figura 128 – Início e Fim da Etapa de Aceleração Leve/Cruzamento Curto em HHV em Série.....	304
Figura 129 – Início e Fim da Etapa de Aceleração Brusca/Cruzamento Estendido em HHV em Série.....	305
Figura 130 – Início e Fim da Etapa de Frenagem Regenerativa em HHV em Série.....	305
Figura 131 – Etapa de Frenagem Regenerativa em HHV em Paralelo.....	306
Figura 132 – Etapa de Aceleração Leve em HHV em Paralelo.....	306
Figura 133 – Etapa de Aceleração Estendida em HHV em Paralelo.....	306
Figura 134 – Etapa de Cruzamento em HHV em Paralelo.....	307

Figura 135 – Bomba de Prato Oscilante (esquerda) e Bomba/Motor de Eixo Curvo (direita)	308
Figura 136 – Tipos de Acumulador	308
Figura 137 – Concepção de um Motor Linear a partir de um Motor Elétrico Convencional	311
Figura 138 – Demonstração de Sistema de Levitação Eletromagnética por uma Esfera Metálica e um Eletroímã	313
Figura 139 – Linha Teste de 200 m em Construção no Brasil.....	315
Figura 140 – Protótipo de Veículo de Levitação Supercondutora Desenvolvido pelo IFW na Alemanha	315
Figura 141 – Componentes de uma Aeronave Movida a Energia Solar ...	316
Figura 142 – Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS) de um Avião Movido a Energia Solar	317
Figura 143 – Solar Impulse 2	319
Figura 144 – Avião Solar Heliplat Sobrevoando a uma Altitude de 20 km e Cobrindo uma Área de Diâmetro de 300 km	322
Figura 145 – Evolução da Frota Circulante dos Automóveis – Cenários BC e BC+I	324
Figura 146 – Frota de Caminhões – Cenário Inovação	325
Figura 147 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Combustível	328
Figura 148 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Modal – Inovação	329
Figura 149 – Emissão de Gases de Efeito Estufa por Modal – Inovação.....	330
Figura 150 – Exemplo de um Sistema de <i>Feebate</i>	342
Figura 151 – Etiquetagem de Veículos Leves nos Estados Unidos	344
Figura 152 – Metas do Cafe até 2025	345
Figura 153 – Metas da União Europeia para 2015	347
Figura 154 – Valor da Multa da Regulação Europeia de 2015	348

Figura 155 – Etiquetação de Veículos Leves no Reino Unido	349
Figura 156 – Processo de Definição de Metas da Política Japonesa para 2020	351
Figura 157 – Metas Japonesas para os Anos de 2010, 2015 e 2020	352
Figura 158 – Etiquetação de Veículos Leves no Japão	353
Figura 159 – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia para Veículos Leves	355
Figura 160 – Metas de Eficiência do Inovar-Auto de Acordo com o Peso do Veículo a Gasolina	359
Figura 161 – Valor da Multa Prevista no Inovar-Auto em Função da Eficiência do Veículo.....	360
Figura 162 – Comparação Absoluta entre Padrões de Eficiência Veicular e Eficiência Histórica dos Veículos de Cada País	362
Figura 163 – Comparação Relativa entre Padrões de Eficiência Veicular de Cada País	362
Figura 164 – Comparação entre Medidas Fiscais de Sete Países	363
Figura 165 – Visão Aérea da Trafalgar Square em Londres	369
Figura 166 – Plano de Desenvolvimento do Transporte Urbano de Berlim	370
Figura 167 – Sistema de BRT de Bogotá: TransMilenio	371
Figura 168 – Estrutura do Transporte Coletivo em Curitiba	374
Figura 169 – Evolução do Transporte Coletivo em Curitiba (1974-2006)	375
Figura 170 – Participação Relativa de Cada Modal no Transporte de Carga por País.....	377
Figura 171 – Zona de Baixa Emissão de Poluentes em Londres.....	398
Figura 172 – Compartilhamento de Carro Elétrico em Paris	399
Figura 173 – <i>Car Free</i> : Zona de Pedestres em Berlim com Acesso Restrito a Veículos.....	401

Figura 174 – Portal de Transporte Público da Cidade de Londres	402
Figura 175 – Distribuição Modal da Matriz Brasileira com e sem Minério de Carga – 2011	405
Figura 176 – Consumo Energético	412
Figura 177 – Emissões de GEE	412
Figura 178 – Decomposição dos Efeitos de Redução do Consumo Energético – Cenários de Referência e de Baixo Carbono	413
Figura 179 – Decomposição dos Efeitos de Redução das Emissões – Cenários de Referência e de Baixo Carbono.....	413

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais Terminais de Uso Privado e Suas Localizações	100
Quadro 2 – Exemplos de Transporte Hidroviário em Território Nacional	106
Quadro 3 – Comparação entre Célula a Combustível, Bateria e Motor a Combustão Interna.....	164
Quadro 4 – Critério Atual da Mistura dos Bicombustíveis por País.....	188
Quadro 5 – Veículos e Combustíveis Considerados no Transporte de Passageiros	199
Quadro 6 – Premissas Gerais do Cenário de Baixo Carbono	252
Quadro 7 – Inserção de Tecnologias.....	260
Quadro 8 – Inserção Tecnológica ao Longo do Tempo	260
Quadro 9 – Níveis de Maturidade Tecnológica	261
Quadro 10 – Penetração de Ações de Eficiência Energética nas Embarcações de Passageiros	271
Quadro 11 – Cronograma de Ações de Eficiência Energética em Embarcações de Passageiros Existentes.....	271
Quadro 12 – Penetração de Ações de Eficiência Energética nas Embarcações de Carga	275
Quadro 13 – Cronograma de Ações de Eficiência Energética em Embarcações de Transporte de Carga Existentes	276
Quadro 14 – Principais Vantagens e Desvantagens das Células a Combustível	293
Quadro 15 – Comparação entre a Tecnologia de Levitação Magnética com o Sistema Convencional Roda-Trilho	310
Quadro 16 – Principais Projetos de Veículos de Levitação Magnética no Mundo.....	312
Quadro 17 – Características de Diferentes Tipos de Políticas de Eficiência Veicular	337

Quadro 18 – Comparação entre Diferentes Formatos de Padrões de Eficiência Veicular	341
Quadro 19 – Resumo da Política de Eficiência Veicular dos EUA	346
Quadro 20 – Resumo da Política de Eficiência Veicular Europeia.....	350
Quadro 21 – Resumo da Política de Eficiência Veicular Japonesa	353
Quadro 22 – Barreiras e Cobenefícios Relacionados à Adoção de Medidas de Eficiência Energética.....	364
Quadro 23 – Barreiras e Cobenefícios Relacionados à Adoção de Medidas de Mudança Modal.....	389
Quadro 24 – Barreiras e Cobenefícios Relacionados à Adoção de Medidas de Biocombustíveis	393
Quadro 25 – Quadro-Síntese dos Subsídios para a Elaboração de Instrumentos de Políticas Públicas para Aplicação das Medidas Propostas	408

LISTA DE ABREVIATURAS

ABDI – Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial

ABRACICLO – Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares

ABRATI – Associação Brasileira das Empresas de Transporte Terrestre de Passageiros

ABVE – Associação Brasileira do Veículo Elétrico

AERIS – Applications for the Environment: Real-Time Information Synthesis

AFC – Alkaline Fuel Cell

ALLMN – América Latina Logística Malha Norte S.A.

ALLMO – América Latina Logística Malha Oeste S.A.

ALLMP – América Latina Logística Malha Paulista S.A.

ALLMS – América Latina Logística Malha Sul S.A.

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil

ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ANPTrilhos – Associação Nacional dos Transportadores de Passageiros sobre Trilhos

ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários

ANTF – Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários

ANTP – Associação Nacional de Transportes Públicos

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres

ATAG – Air Transport Action Group

ATD – Air Transport Department

BEN – Balanço Energético Nacional

BID – Banco Interamericano de Desenvolvimento

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

BRT – Bus Rapid Transit

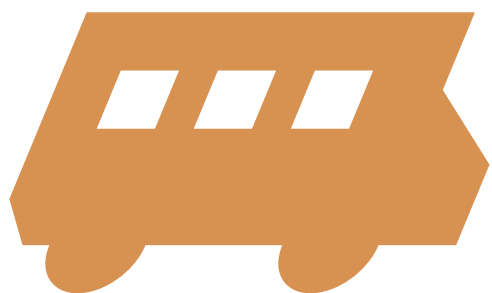
BTL – Biomass to Liquids

BWB – Blended Wing Body
CH₄ – Metano
CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CNT – Confederação Nacional do Transporte
COOPEAD – Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração da
Universidade Federal do Rio de Janeiro
CO₂eq – Dióxido de Carbono Equivalente
DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito
DFT – Department for Transport
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DOE – Department of Energy
DOT – Department of Transportation
ECP – Electronically Controlled Pneumatic
EDL – Electro Dynamic Levitation
EFC – Estrada de Ferro Carajás
EFVM – Estrada de Ferro Vitória a Minas
EML – Electro Magnetic Levitation
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
EPL – Empresa de Planejamento e Logística S.A.
FCA – Ferrovia Centro-Atlântica S.A.
FERROESTE – Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A.
FIPE – Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas
FNS – Ferrovia Norte-Sul
FOB – Free on Board
FT – Fischer-Tropsch
FTA – Freight Transport Association
FTC – Ferrovia Tereza Cristina S.A.
GAV – Gasolina de Aviação
GCF – Green Climate Fund
GEE – Gases de Efeito Estufa
GEF – Global Environmental Facility

GFTA – Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo
GNV – Gás Natural Veicular
GPS – Global Positioning System
GTTP – Grupo de Trabalho de Trens de Passageiros
HPO – Heavy Pyrolysis Oil
HVO – Hydrotreated Vegetable Oils
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis
ICAO – International Civil Aviation Organization
ICCT – International Council on Clean Transportation
ICMS – Imposto sobre Operações Relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestações de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação
IEA – International Energy Agency
IMO – International Maritime Organization
INFRAERO – Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária
INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change
IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPP – Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos
IPVA – Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores
ISO 8217 – International Organization for Standardization 8217: Fuel Standard for Marine Distillate Fuels
ITF – International Transport Forum
IZT – Institute for Futures Studies and Technology Assessment
JAMA – Japan Automobile Manufacturers Association
LASUP – Laboratório de Aplicações de Supercondutores
LED – Light-Emitting Diode
LOA – Length Overall
LRT – Light Rail Transit
MCIDADES – Ministério das Cidades

MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell
MCI – Motor a Combustão Interna
MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MDIC – Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços
MMA – Ministério do Meio Ambiente
MP – Ministério do Planejamento
MRS – MRS Logística S.A.
MT – Ministério dos Transportes
MTD – Melhores Tecnologias Disponíveis
NACFE – North American Council for Freight Efficiency
NRC – National Research Council
N₂O – Óxido Nitroso
OECD – Organization for Economic Co-operation and Development
ORNL – Oak Ridge National Laboratory
PKM – Passageiros-quilômetro
PAC – Programa de Aceleração do Crescimento
PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell
PART – Plataforma for Aerodynamic Road Transport
PEMFC – Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PHE – Plano Hidroviário Estratégico
PIB – Produto Interno Bruto
PIL – Programa de Investimento em Logística
PNAD – Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
PNLP – Plano Nacional de Logística Portuária
PNLT – Plano Nacional de Logística e Transportes
PROCONVE – Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
Psi – Pounds per Square Inch
QAV – Querosene para Aviação
REN21 – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century

RET – Department of Resources, Energy And Tourism
RNTC – Registro Nacional de Transportador de Carga
RPK – Revenue Passenger Kilometers
RTRI – Railway Technical Research Institute
SENAT – Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte
SEST – Serviço Social do Transporte
SINDIPEÇAS – Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores
SML – Superconducting Magnetic Levitation
SPNT – Secretaria de Política Nacional de Transportes
TAV – Trem de Alta Velocidade
TCN – Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
TCU – Tribunal de Contas da União
Tep – Tonelada equivalente de petróleo
TJ – Terajoule
TKU – Tonelada-Quilômetro Útil
TLSA – Transnordestina Logística S.A.
TOSCA – Technology Opportunities and Strategies towards Climate Friendly Transport
TPB – Tonelagem de Porte Bruto
TUP – Terminais de Uso Privado
UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
US EPA – United States Environmental Protection Agency
UTG – University of Technology Graz
VCC – Veículo a Célula a Combustível
VEB – Veículo Elétrico a Bateria
VLT – Veículo Leve sobre Trilhos
WBT – Wide Base Tire
Wh – Watt-hora



Introdução

INTRODUÇÃO

Os meios de transporte são responsáveis pela movimentação de bens e pessoas e têm papel fundamental nas sociedades. Seu desempenho provoca impactos amplos e profundos sobre o sistema socioeconômico, influenciando, de forma estratégica, o progresso de uma nação.

A importância do setor de transportes fica evidenciada quando relacionada aos índices de crescimento econômico, como renda *per capita* ou Produto Interno Bruto (PIB) de um país. O trabalho de Schafer e Victor (2000) relaciona, baseado em uma série histórica, a renda *per capita* e o volume de deslocamentos motorizados de diversos países, mostrando ser evidente a relação positiva entre enriquecimento e mobilidade.

A relação entre crescimento da posse veicular e renda *per capita*, contudo, é altamente não linear. A posse veicular por habitante é geralmente mínima nos países de renda mais baixa, mas aumenta rapidamente à medida que a renda *per capita* aumenta, conforme apresentado na Figura 1. O nível de saturação fica em torno de 0,80 veículo por habitante (DARGAY; GATELY; SOMMER, 2007).

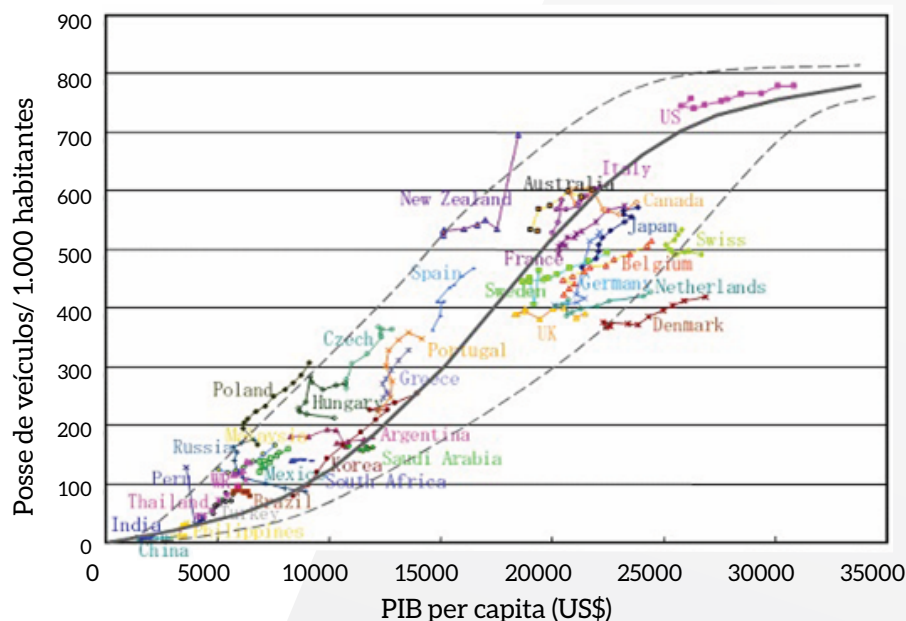


Figura 1 – Posse de Veículos por Habitante em Função da Renda Per Capita

Fonte: IPCC, 2007

De fato, a saturação da posse veicular, somada a outros fatores, tal qual a maior disponibilidade de transporte público, tem levado a taxas mais lentas de crescimento em várias medidas de uso do automóvel em determinados países desenvolvidos, o que se convencionou chamar de *peak car use* (GOODWIN; DENDER, 2013; METZ, 2013). No entanto, não se espera que as tendências de *peak car use* ocorram nos próximos anos nos países em desenvolvimento, embora a rápida urbanização e a motorização em massa desses países pressionem ainda mais o crescimento limitado de infraestrutura e serviços (FIGUEROA; RIBEIRO, 2013).

A importância dos meios de transportes se choca com o seu alto consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa (GEE), dando ao setor lugar de destaque no planejamento energético e ambiental. Atualmente, o setor caracteriza-se pela forte concentração nos derivados de petróleo como fonte de energia e na distribuição modal desbalanceada em favor do transporte rodoviário. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2013a), cerca de 93% do consumo mundial de energia no setor de transportes se dão na forma de derivados de petróleo. No Brasil, essa relação é de 80%, com destaque para gasolina e óleo diesel, visto que 12% representam o consumo de álcool etílico. A Figura 2 exhibe a distribuição do consumo energético dos diferentes combustíveis no setor de transportes mundial.

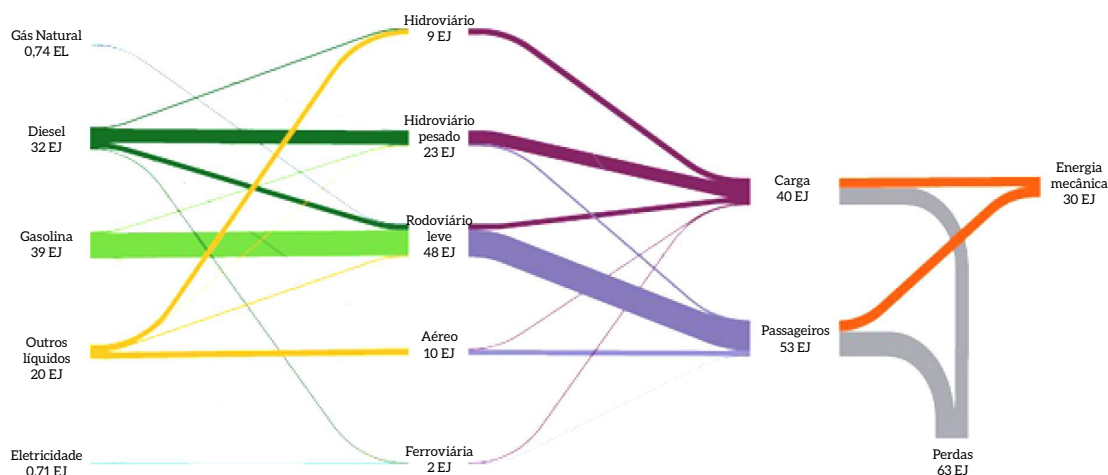


Figura 2 – Distribuição do Consumo Final de Energia no Setor de Transportes – Mundo

Fonte: IEA, 2012a

As emissões de GEE pelo setor de transportes, por sua vez, mais que dobraram desde 1970 e têm aumentado a um ritmo mais rápido do que qualquer outro setor da economia, chegando a 7,0 GtCO₂ e, em 2010, sendo responsável por, aproximadamente, 23% das emissões de CO₂ relacionadas com o uso de energia. Do total emitido em 2010 pelo setor, cerca de 72% estão relacionados com o modal rodoviário (Figura 3) (IPCC, 2014).

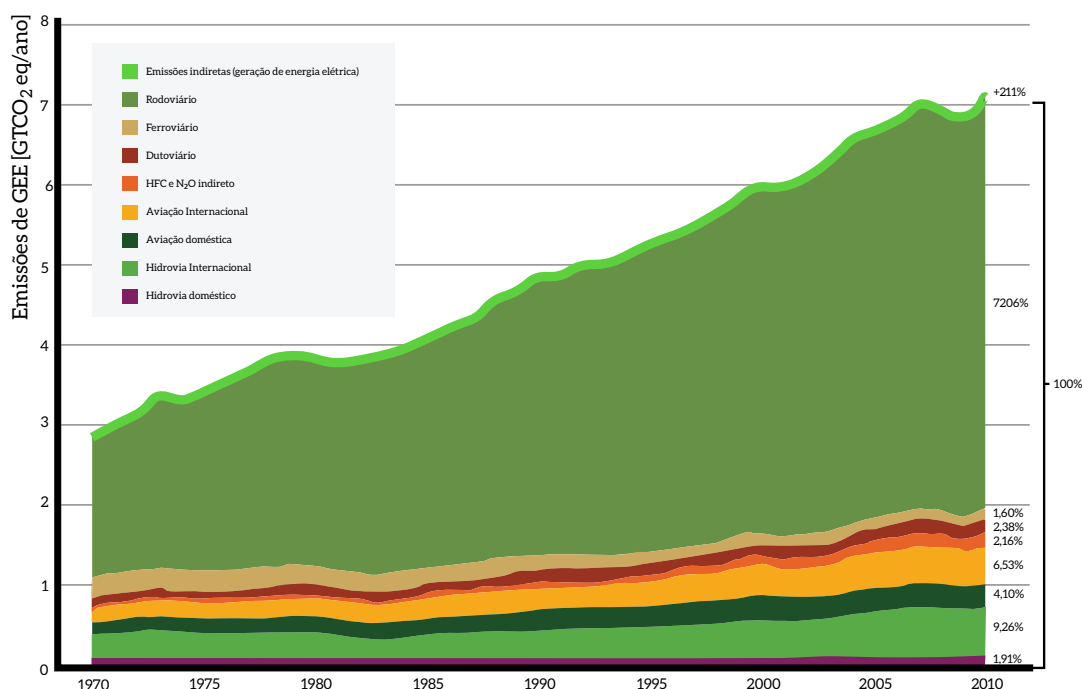


Figura 3 – Emissões Diretas de GEE pelo Setor de Transportes – Mundo

Fonte: IPCC, 2014

Sendo assim, a utilização de fontes alternativas de energia, como o álcool combustível e o gás natural, a valorização de modais menos intensivos em energia e a efficientização da frota de automóveis são exemplos de medidas a serem tomadas a fim de se buscar maior eficiência no uso da energia e de tornar o desenvolvimento menos dependente do petróleo.

Porém, como destaca Moraes (2005), a maior penetração de mudanças capazes de alterar os padrões e as estruturas vigentes no setor de transportes depende de diversos fatores políticos e econômicos, sendo necessário um grande e persistente esforço de planejamento de longo prazo. Isso ocorre devido às inúmeras vantagens do petróleo, que, dentre outras, apresenta alta densidade energética, baixo custo e uma indústria com vasta infraestrutura mundial de transporte, distribuição e revenda (SZKLO; SCHAEFFER, 2006).

Soma-se a isso o fato de o setor de transportes caracterizar-se por equipamentos de longa duração e com elevado custo afundado (particularmente, aviões, trens e navios de grande porte) (IPCC, 2014). Por outro lado, a incorporação de uma nova tecnologia na linha de produção de uma fábrica requer adaptações e investimentos que não ocorrem no curto prazo (GREENE; PLOTKIN, 2011). Apesar da falta de progresso até o momento, a transição necessária para reduzir as emissões de GEE no setor pode surgir a partir de novas tecnologias, implementação de políticas rigorosas e mudanças comportamentais.

Um aspecto a ser considerado é que os países em desenvolvimento, como o Brasil, não dispõem de sistemas de transportes maduros e devem experimentar um crescimento relevante nos próximos anos. Tal fato confere a esses países, por um lado, o risco de tornar a movimentação de passageiros e cargas ainda mais intensiva em energia e poluidora e, por outro, a oportunidade de realizar uma expansão com qualidade e eficiência. Torna-se evidente, então, a importância de conhecer as características e peculiaridades do sistema de transportes brasileiro e planejar seu desenvolvimento a fim de que seja identificada a melhor alternativa para a evolução do setor.

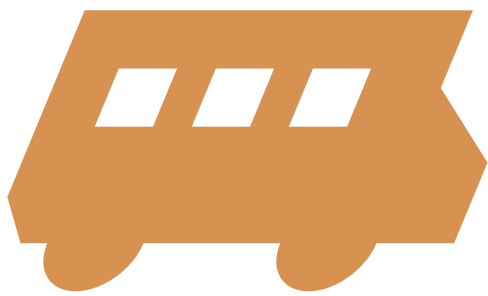
Nesse aspecto, este estudo tem por objetivo auxiliar o governo brasileiro a reforçar a sua capacidade técnica de apoiar a implementação de ações de mitigação de emissões de GEE no setor de transportes.

As perspectivas de consumo de energia do setor de transportes encontram-se em consonância com os cenários de crescimento da economia como um todo, com as premissas de preços de combustíveis e de mobilidade urbana, bem como com as trajetórias tecnológicas identificadas para cada um dos segmentos analisados e as perspectivas de substituições intermodais. Ademais, os projetos estratégicos de infraestrutura de transportes do governo federal, previstos nos planos governamentais, são considerados nas projeções do setor, pressupondo-se que serão efetivamente implementados.

Neste relatório, descreve-se, ao longo do primeiro capítulo, o respectivo setor do ponto de vista de consumo de energia, com foco nos modais rodoviário, ferroviário, hidroviário e aéreo. Para tanto, são utilizados como referência trabalhos anteriores elaborados pela equipe de trabalho, assim como as estatísticas relevantes do setor. No segundo capítulo, apresentam-se as emissões de GEE do setor de transportes no período 2002-2012. No terceiro capítulo, são apresentadas as melhores tecnologias disponíveis (MTD) para reduzir emissões de GEE no setor e são compilados e analisados trabalhos prospectivos da literatura científica, bem como consultados organismos e entidades internacionais que lidam com novas tecnologias e inovações. No quarto capítulo, desenvolve-se uma metodologia de projeção da demanda energética e das emissões de GEE para o setor de transportes para o horizonte 2050. No quinto capítulo, são discutidas as premissas, as hipóteses e os resultados para a construção do cenário de referência (REF). Esse cenário apresenta características de base de mercado sem maiores mudanças qualitativas e que mantém o ritmo natural de incorporação de tecnologia e evolução de cotas de mercado dos combustíveis. Ou seja, a principal característica do cenário de referência é a manutenção de tendências setoriais já em curso, não havendo alterações estruturais no horizonte de análise. No sexto capítulo, são discutidas as premissas, as hipóteses e os resultados para a construção do cenário de baixo carbono (BC). Esse cenário busca incorporar programas, políticas públicas, ações e estratégias que podem ser desenvolvidas no setor de transportes com o objetivo de se reduzirem as emissões de GEE pelo setor, com foco em três pontos principais: maior uso de biocombustíveis, valorização de modais menos intensivos em energia e efficientização da frota de veículos. Ademais, são apresentados os custos marginais de abatimento das medidas consideradas nesse cenário. No sétimo capítulo, apresenta-se a projeção do cenário de inovação da demanda energética e das emissões de GEE do setor de transportes para o horizonte 2050. Esse cenário tem as características básicas do cenário BC, com a consideração da entrada de tecnologias inovadoras do setor, ou seja, tecnologias que estão tecnicamente desenvolvidas ou em desenvolvimento, porém com elevado custo de implementação (barreiras econômicas). No oitavo capítulo, são apresentados os subsídios para a

formulação de instrumentos de políticas públicas para o setor de transportes de modo que seja possível a migração de um cenário tendencial para um cenário BC no horizonte 2050. Por fim, no nono capítulo, são apresentadas as conclusões do estudo.

Este relatório considera uma avaliação setorial, a qual não observa possíveis efeitos de não aditividade dos potenciais de mitigação do sistema energético. De fato, a avaliação setorial é relevante, sobretudo, para realizar o mapeamento das MTD, visando à mitigação setorial de emissões de GEE, para, partindo disso, constituir uma base de dados visando à modelagem do setor de transportes em cenários integrados do sistema energético e do setor de agricultura, florestas e outros usos do solo. Portanto, resultarão dos cenários integrados estimativas robustas dos potenciais e custos de abatimento desses setores que serão reportadas no relatório relativo à modelagem integrada. Além disso, a avaliação setorial é relevante fonte de subsídios para os formuladores de políticas públicas elaborarem instrumentos visando à implementação de cenários de baixo carbono.



O setor de transportes no Brasil

Capítulo

1

1 O SETOR DE TRANSPORTES NO BRASIL

Este capítulo apresenta questões associadas ao consumo de energia e às emissões de gases de efeito estufa (GEE) no setor de transportes no Brasil e mostra a evolução do consumo de energia e emissões de GEE nesse setor, nos últimos anos. Descreve, ainda, de forma sintética, o estado da arte dos principais modais de transporte, apresentando algumas características e particularidades do transporte de passageiros e de carga no Brasil.

1.1 PANORAMA GERAL DO SETOR DE TRANSPORTES NO BRASIL

O setor de transportes é essencial para o desenvolvimento de um país visto que garante o acesso aos insumos, no caso das indústrias, aos bens de consumo, por parte dos consumidores, e permite o desenvolvimento do comércio exterior. Qualquer nação fica literalmente paralisada se houver interrupção de seu sistema de transportes (SCHAEFFER; SZKLO; MACHADO, 2004).

No Brasil, o desenvolvimento do setor de transportes se iniciou com a navegação costeira, passando por um período que favoreceu o modal ferroviário durante as décadas de 1930 e 1940 (CNT, 2014). Nesse período, mais de 30 mil km de vias foram construídos, tendo como objetivo principal a exportação de produtos primários, particularmente café (BRASIL/SPNT, 2012). Após a crise de 1929, houve uma crescente industrialização do Brasil paralelamente ao fortalecimento do mercado interno, o que acarretou a necessidade de construção de estradas para atender a distribuição dos produtos fabricados na região Sudeste.

A partir da segunda metade da década de 1950, com a expansão da indústria automobilística, o transporte rodoviário se consolidou no país. Entre 1940 e 1970, a rede rodoviária foi expandida de 185 mil km para cerca de 1,5 milhão de km (malha pavimentada e não pavimentada). Nesse mesmo período, a rede ferroviária foi reduzida de 38 mil km para cerca de 30 mil km, sendo que menos de 10% dessa rede estavam eletrificados (MARTINS et al., 2010).

Com o passar dos anos, mesmo com a constatação dos problemas provocados por essa distorção na matriz de transportes, as crises econômicas, a inércia nos investimentos em outros modais e a priorização do atendimento de demandas de curto prazo nas estruturas decisórias permitiram o agravamento da situação (SCHAEFFER; SZKLO, 2008).

Atualmente, o modal rodoviário representa 52% da matriz de transporte brasileira de carga (medida em tonelada-quilômetro útil – TKU), o que demonstra a forte dependência desse modal (BRASIL/SPNT, 2012). A distribuição modal de transportes no Brasil pode ser observada na Figura 4, de um total de, aproximadamente, 1,2 trilhão de TKU. Cabe destacar a participação praticamente nula do modal aéreo no transporte de carga, inferior a 12 bilhões de TKU, ou seja, 0,1% do total nacional (não exibido na Figura 4).

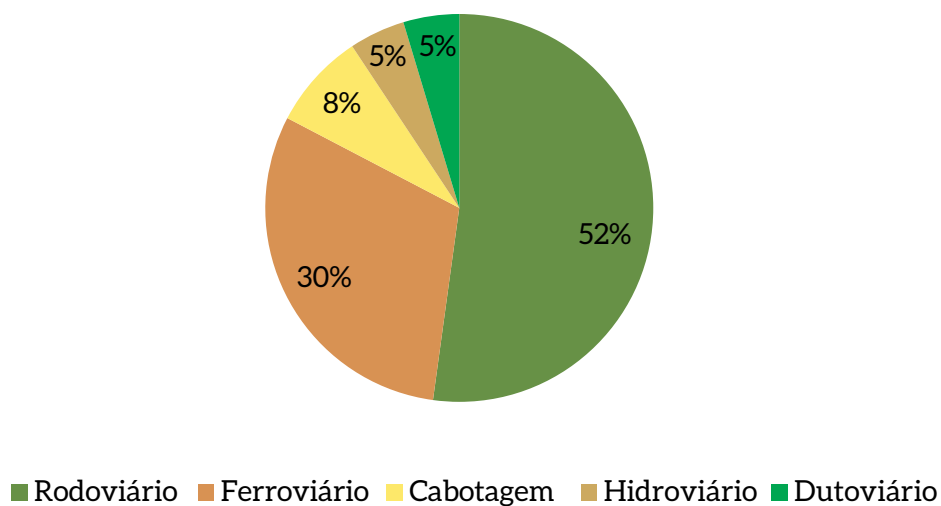


Figura 4 – Distribuição Modal da Matriz Brasileira de Transportes de Carga

Fonte: BRASIL/SPNT, 2012

No que tange à matriz de transporte de passageiros, a participação do modal rodoviário torna-se mais acentuada. Desde o final da década de 1960, o transporte de passageiros aumentou a uma taxa média de 6,4% ao ano. De fato, a atividade de transporte de passageiros se alterou consideravelmente a partir da década de 1970. O principal responsável por essa mudança foi o transporte ferroviário, que perdeu espaço, em especial, para o transporte rodoviário, cuja participação era crescente até 2000 (EPE, 2012a). A distribuição modal de transportes de passageiros no Brasil pode ser observada na Figura 5, de um total de, aproximadamente, 1,6 trilhão de passageiros-quilômetro transportados. Destaca-se também a baixa participação do modal aquaviário, não apresentada na Figura 5, da ordem de 0,1% da matriz nacional.

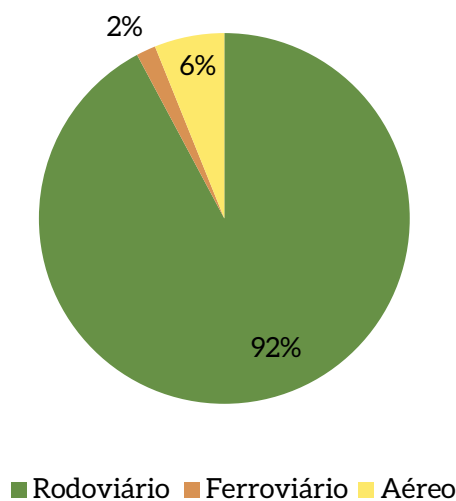


Figura 5 – Distribuição Modal da Matriz Brasileira de Transportes de Passageiros

Fonte: EPE, 2012a

Desde 1980, o setor de transportes nacional é o segundo maior usuário de energia final, com uma participação que varia entre 25% e 30% do uso final de energia, sendo responsável por 69% do consumo final energético dos derivados de petróleo e gás natural no país. Em 2012, o setor demandou cerca de 79 milhões de toneladas equivalentes de petróleo, dos quais mais de 90% foram consumidos no modal rodoviário (EPE, 2014a), conforme se pode verificar na Tabela 1.

Tabela 1 – Consumo Final de Energia no Setor de Transportes Nacional por Modal

(ktEp)	Rodoviário	Ferrovário	Hidroviário	Aeroviário	Total
2002	44.456	773	1.036	3.135	49.400
2003	44.329	767	954	2.241	48.291
2004	47.334	868	1.096	2.392	51.690
2005	48.074	926	1.124	2.596	52.720
2006	49.067	1.040	1.088	2.435	53.630
2007	52.892	1.115	1.338	2.674	58.019
2008	57.354	1.149	1.452	2.874	62.829
2009	57.316	1.125	1.359	3.241	63.041
2010	63.582	1.135	1.380	3.623	69.720
2011	67.698	1.148	1.323	3.820	73.989
2012	73.406	1.181	1.586	3.135	79.308

Fonte: EPE, 2014a

O óleo diesel é o combustível mais consumido no setor, representando 46% do consumo de energia (EPE, 2014a), devido, principalmente, à forte participação dos veículos pesados (ônibus e caminhões) de transporte coletivo e de carga. Apesar de o diesel ser o principal combustível do setor, a gasolina automotiva e o álcool etílico desempenham papéis importantes, representando, respectivamente, 31% e 13% do consumo total de energia do setor de transportes (EPE, 2014a). A gasolina automotiva, de fato, perdeu participação na matriz energética do setor a partir dos anos 1980, com o lançamento do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), mas recuperou espaço durante a década de 1990.¹ O gás natural veicular (GNV) surgiu na matriz energética automotiva a partir de 2002, atingindo, em 2012, 2,0% da energia consumida, conforme apresentado na Figura 6. Destaca-se, ainda, que, em janeiro de 2005, com o Programa Nacional do Biodiesel, aprovado pela Lei nº 11.097, ficou definido que todo o óleo diesel vendido no país deverá conter determinada proporção de biodiesel, atualmente fixada em 6% em volume.

1 O Proálcool foi lançado em 1975 e tinha como principal objetivo diminuir a vulnerabilidade energética brasileira e reduzir a importação de petróleo. Na década de 1990, devido, principalmente, ao desabastecimento do mercado interno de álcool e à redução dos preços do petróleo, houve declínio na venda de carros a álcool e verificou-se retomada no consumo de gasolina.

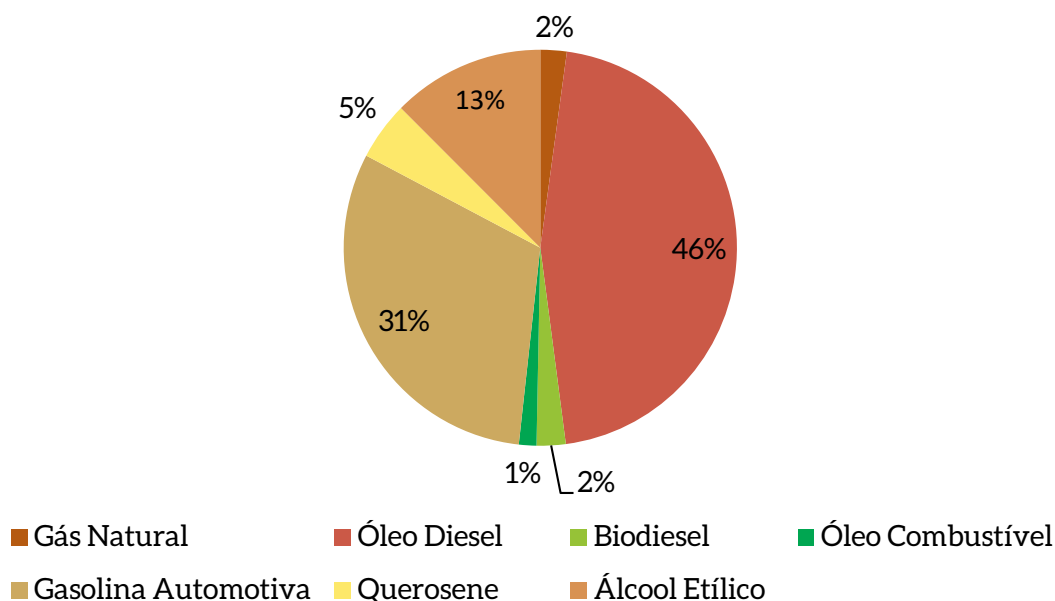


Figura 6 – Distribuição dos Combustíveis Consumidos no Setor de Transportes

Fonte: EPE, 2014a

No Brasil, o álcool etílico hidratado é utilizado como combustível, podendo ser usado pelos veículos cativos a álcool ou flexíveis,² enquanto o álcool etílico anidro é utilizado como aditivo (operando para aumentar a octanagem da gasolina convencional, de forma a melhorar o desempenho de combustível), misturado à gasolina em uma concentração obrigatória e flexível que varia de 20% a 25% em volume, de acordo com a disponibilidade de etanol e prática de preços do produtor (FREITAS; KANEKO, 2011).

Um sistema de transportes eficiente depende da amplitude, da qualidade e da integração de sua infraestrutura de transportes. No Brasil, o sistema de logística de transportes é pouco desenvolvido, comparativamente a países de grandes dimensões, como Estados Unidos, China, Austrália, Rússia e Canadá. A densidade da malha rodoviária pavimentada e ferroviária do Brasil, obtida pela divisão da quilometragem de rodovias e ferrovias existentes pela área territorial do país, é a menor entre os países considerados, conforme mostrado na Figura 7.

² Veículos que podem utilizar como combustível álcool etílico hidratado ou gasolina C simultaneamente em qualquer proporção.

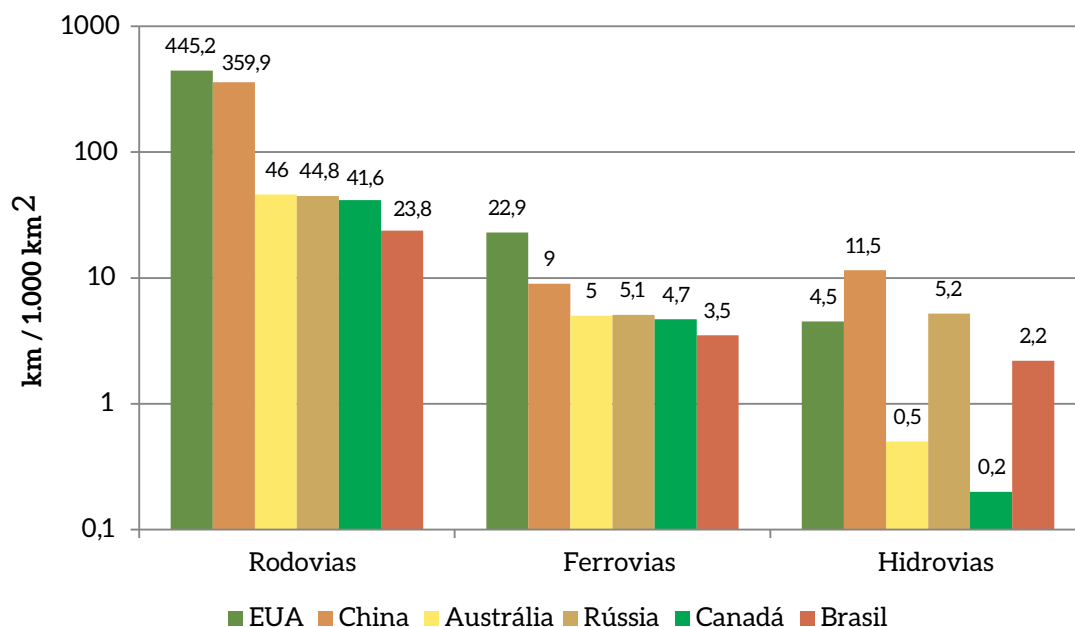


Figura 7 – Densidade de Infraestrutura de Transportes em Países Selecionados

Fonte: CNT, 2011, 2014

Especificamente no transporte hidroviário interior, para o qual o indicador do país é superior ao do Canadá e ao da Austrália, o Brasil dispõe de uma infraestrutura construída inferior ao seu potencial. Com uma utilização das hidrovias de acordo com o seu potencial, o Brasil estaria posicionado em densidade de vias navegáveis entre China e Rússia (CNT, 2013a).

Tal carência de infraestrutura de transportes foi agravada, em boa medida, pela queda do patamar de investimentos em sistemas de transportes no país. Desde 1975, o investimento público federal em infraestrutura de transporte, como proporção do PIB, caiu de 1,84% para 0,29%, em 2012 (Figura 8). A tendência de crescimento verificada na última década parecia demonstrar uma tentativa de retomada sustentável dos patamares de investimentos registrados no passado. Contudo, nos dois últimos anos, constatou-se diminuição no investimento público, que passou de 0,36% para 0,29% entre 2011 e 2012, respectivamente (CNT, 2014).

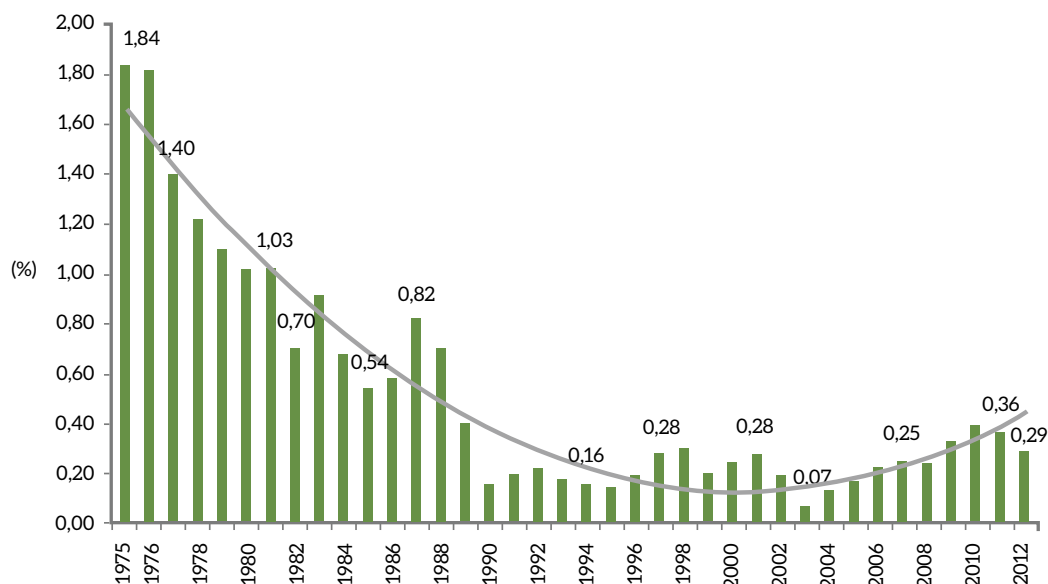


Figura 8 – Evolução do Investimento Federal em Infraestrutura de Transporte (Investimento/PIB)

Fonte: CNT, 2014

A degradação da infraestrutura de transportes e a falta de integração sistêmica afetam, sobremaneira, o padrão de eficiência energética do sistema de transportes, gerando desperdício de combustíveis e de recursos econômicos (SCHAEFFER; SZKLO; MACHADO, 2004).

É importante destacar que o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), lançado em 2007, e a segunda etapa do programa, o PAC 2, lançado em 2010, buscaram retomar os investimentos em infraestrutura de transportes no Brasil. Além de investimentos em infraestrutura, os programas visavam atacar entraves ao desenvolvimento do setor, complementado por medidas econômicas e institucionais. Contudo, dos R\$ 104 bilhões previstos para investimentos em transportes, entre 2011 e 2014, apenas R\$ 58,9 bilhões foram investidos em empreendimentos em todo o país até abril de 2014 (BRASIL/MP, 2014a e 2014b).

Ademais, em agosto de 2012, foi lançado o Programa de Investimento em Logística (PIL), que amplia a velocidade de investimentos em infraestrutura de transportes, notadamente rodovias, ferrovias e portos, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Investimentos em Infraestrutura de Transportes no Brasil – PIL

	Investimentos Previstos (Bilhões de Reais)	Características
Rodovias	46,0	7.000 km
Ferrovias	99,6	11.000 km
Portos	54,6	Expandir e modernizar os portos do país
Aeroportos	16,5	2 aeroportos (Galeão e Confins) e 270 aeroportos regionais
Trem de alta velocidade	35,6	511 km
Total	252,3	

Fonte: EPL, 2014a

O PIL busca ampliar a escala dos investimentos públicos e privados em infraestrutura com duplicação dos principais eixos rodoviários do país, reestruturação do modelo de investimento e exploração das ferrovias, expansão da malha ferroviária, modernização de portos e aeroportos e construção do trem de alta velocidade (TAV), que representa um serviço de transporte ferroviário de passageiros que conectará as cidades do Rio de Janeiro, São Paulo e Campinas.

1.2 MODAL RODOVIÁRIO

Atualmente, existem no país 1.691.521 km de rodovias, dos quais apenas 203.598 km são pavimentados, isto é, 12% da malha. Entre as rodovias pavimentadas, 65.930 km são federais, conforme exibido na Tabela 3.

Tabela 3 – Extensão da Rede Rodoviária – Brasil

(km)	Rede Não Pavimentada	Rede Pavimentada	Extensão Total da Rede
Federal	12.577	65.930	78.507
Estadual	111.334	110.842	222.176
Municipal	1.234.918	26.826	1.261.744
Rede planejada			129.094
Total	1.358.829	203.598	1.691.521

Fonte: DNIT, 2013

A importância do modal rodoviário no país contrasta com problemas associados à conservação das vias pavimentadas existentes. A pesquisa sobre rodovias, conduzida pelo CNT em 2013, revela que, dos 96.714 km pesquisados, apenas 36% foram considerados como “Bom” ou “Ótimo”, como exibido na Figura 9.

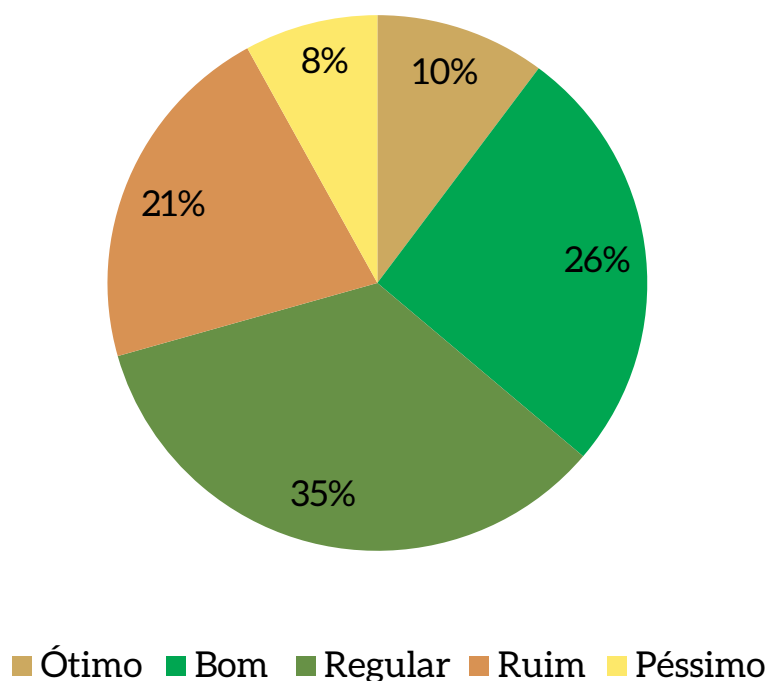


Figura 9 – Condições de Pavimentação da Malha Rodoviária

Fonte: CNT, 2014

Tal situação gera perda de eficiência para o modal rodoviário, além de custos mais elevados para o setor privado nos gastos adicionais de operação de veículos (BRASIL/SPNT, 2012).

1.2.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

Conforme discutido na seção 1.1, o transporte de passageiros no Brasil polarizou-se em direção às rodovias, privilegiado por políticas de Estado orientadas ao modal rodoviário e pelo nascimento da indústria automobilística local nos anos 1950. Nesse contexto, a conjuntura político-industrial, o crescimento populacional e o dinamismo econômico potencializaram a demanda por transporte e impulsionaram o crescimento da frota de veículos automotores.

Particularmente na década de 2000, a melhora do cenário econômico brasileiro, a expansão na oferta de crédito e o apoio crescente do governo federal à indústria automobilística fomentaram as vendas de veículos no Brasil e contribuíram para aumentar a pressão sobre a malha rodoviária existente. A predominância do modal rodoviário no transporte de passageiros reflete-se tanto no

transporte individual quanto no transporte coletivo de passageiros. No entanto, as condições precárias do transporte público, em particular nos grandes centros urbanos, têm estimulado o transporte rodoviário individual, que apresenta maior mobilidade no trajeto e flexibilidade no tocante a horários, quando comparado ao transporte coletivo.

Apesar da intensificação do transporte individual em curtas distâncias, principalmente nos grandes centros urbanos, nota-se a predominância do transporte coletivo para deslocamentos de longa distância como resultado do fluxo de passageiros de ligações intermunicipais e interestaduais (ABRATI, 2014). A região Sudeste, por contabilizar a maior parte da população brasileira e maior desenvolvimento econômico, apresenta a maior demanda de transporte interestadual de passageiros para longas distâncias³ (ANTT, 2014a, 2014b), como exibido na Figura 10.

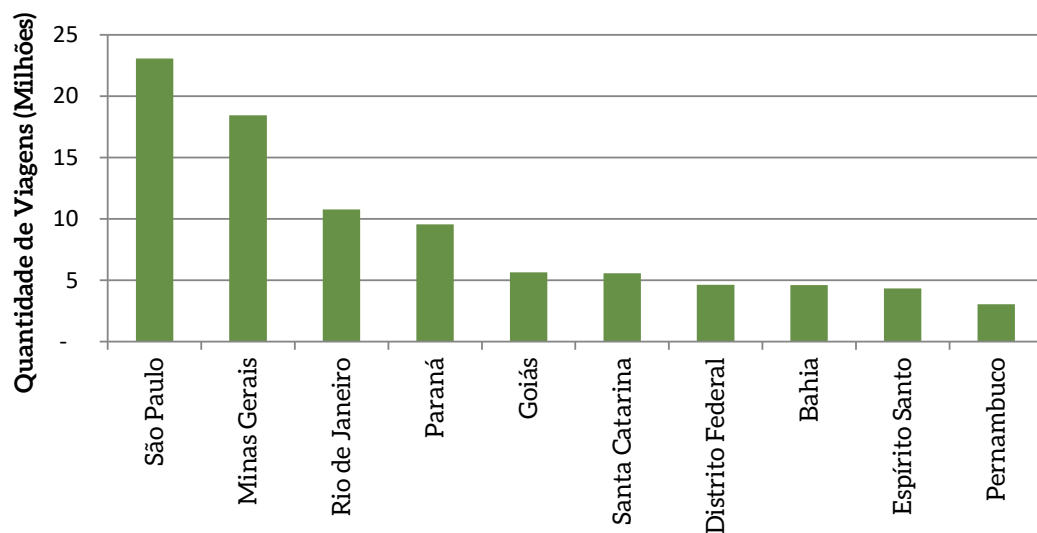


Figura 10 – Estados com Maior Demanda de Transporte Interestadual Rodoviário

Fonte: ANTT, 2014b

Na média nacional das cidades com mais de 60 mil habitantes, o transporte rodoviário motorizado responde por, aproximadamente, 56% dos deslocamentos realizados, sendo complementado majoritariamente pelo transporte não motorizado (a pé e bicicleta) e marginalmente pelo transporte utilizando trilhos, conforme exibido na Figura 11.

3 Linhas com extensão superior a 75 km (BRASIL/ANTT, 2014a).

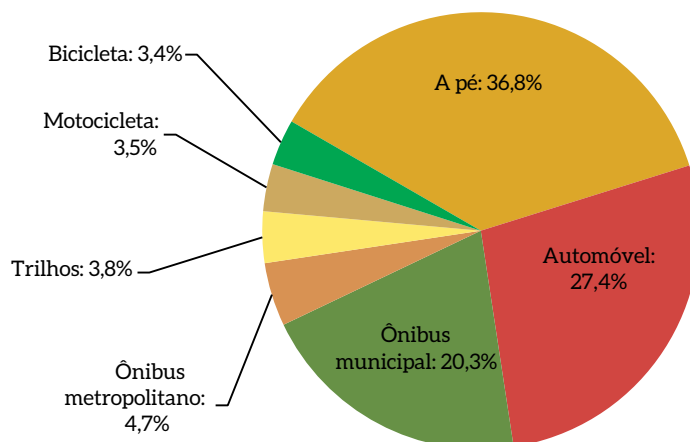


Figura 11 – Mobilidade Urbana e Distribuição Modal – Cidades com Mais de 60 Mil Habitantes

Fonte: ANTP, 2014

A participação do transporte coletivo na média nacional das cidades brasileiras com mais de 60 mil habitantes é de, aproximadamente, 29% do número total de viagens realizadas, enquanto, nas cidades com mais de 1 milhão de habitantes, o transporte coletivo representa 36% e, nas cidades com mais de 60 mil e menos de 100 mil habitantes, o transporte coletivo corresponde a apenas 20%. Tal fato decorre da maior demanda por mobilidade dos grandes centros urbanos. Os municípios com mais de 1 milhão de habitantes apresentam mobilidade de 2,51 viagens por habitante por dia, enquanto os municípios com população entre 60 mil e 100 mil habitantes contrastam o índice com 0,91 viagem por habitante por dia (ANTP, 2014).

Uma importante característica das diferentes cidades do país é a predominância das viagens a pé, que, embora sejam sempre dominantes, na maioria dos municípios, decresce com o aumento da população, enquanto as viagens utilizando motocicleta ou bicicleta aumentam significativamente nos municípios menores.

Ao analisar apenas as viagens motorizadas no segmento rodoviário, verifica-se a predominância do transporte individual na média nacional, que representa 55% dos deslocamentos contra 45% do transporte coletivo nas cidades com mais de 60 mil habitantes. A participação do transporte individual é maior nas cidades com população entre 500 mil e 1 milhão de habitantes (35%) e tende a decrescer em função da população do município (ANTP, 2014).

Contudo, no Brasil, em face da crescente participação do transporte individual na matriz de transporte de passageiros e da qualidade dos serviços de transporte público oferecidos, observa-se que as políticas públicas para fomentar o transporte coletivo não têm surtido efeito amplo. Ao passo que o transporte individual atinge maior participação, ocorrem, conseqüentemente, redução na demanda de transporte coletivo e perdas de receitas para as empresas do setor. A redução da demanda acarreta aumento da tarifa cobrada, que, por sua vez, gera mais perda de demanda, alimentando um

círculo vicioso. Assim, o transporte coletivo urbano, que atende amplamente a população de média e baixa renda, é afetado pelo valor da tarifa, importante mecanismo na formulação de políticas de mobilidade urbana e inclusão social.

A melhora das condições de vida da população e um maior desenvolvimento socioeconômico pressionam a estrutura de transporte rodoviário. À medida que ocorre uma maior motorização, surge também uma série de externalidades negativas para a sociedade, dado que os níveis de poluição aumentam, o tempo de deslocamento cresce em função dos congestionamentos e acidentes de trânsito passam a ser mais frequentes. Impõem-se, assim, novos desafios para a gestão da mobilidade urbana onde atualmente o transporte individual é priorizado.

O número de licenciamento de veículos novos também reforça essa tendência. Em 2012, foram licenciados 5,3 milhões de veículos utilizados no transporte de passageiros, dos quais apenas 29 mil representavam o transporte coletivo (ônibus), como apresentado na Figura 12. No período de 2005 a 2012, o Brasil registrou crescimento de 121% no número de registros anuais de veículos (ANFAVEA, 2015). A disponibilidade de crédito, o aumento da renda e o tamanho da população economicamente ativa foram fatores que contribuíram para o aumento da frota. Além disso, a redução do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) ajudou a estimular o consumo, tornando os preços dos veículos mais atrativos.

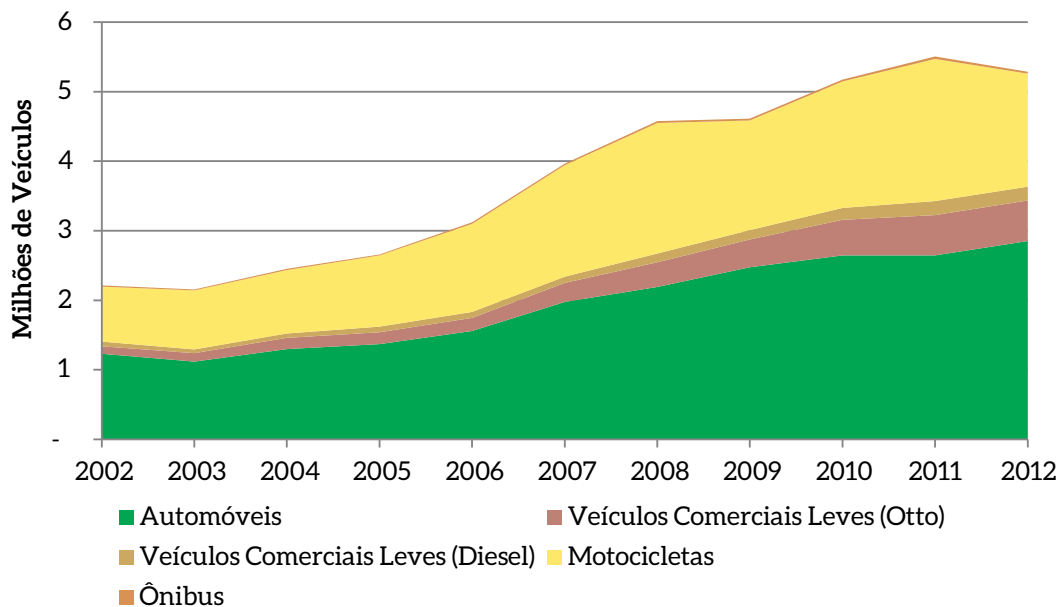


Figura 12 – Licenciamento de Autoveículos Novos por Categoria – Transporte de Passageiros

Fonte: ANFAVEA, 2015

Conjugando os dados disponíveis de venda de veículos automotores no período de 1957 a 2012 com as respectivas curvas de sucateamento associadas às categorias de veículos apresentadas na Tabela 4, pode-se estimar a frota circulante brasileira de veículos. As curvas de sucateamento representam funções que estimam a saída de circulação dos veículos, seja por deterioração ou por sinistro, cujos parâmetros são calibrados por dados estatísticos de uso da frota.

Tabela 4 – Curvas de Sucateamento por Categoria de Veículos – Transporte de Passageiros

Categoria	Função de Sucateamento $S(t)$ – fração de veículos remanescentes na idade t	Parâmetros
Automóvel	$S(t) = 1 - \exp(-\exp(a + b.t))$	$a = 1,798; b = -0,137$
Comerciais leves (Otto)		$a = 1,618; b = -0,141$
Ônibus	$S(t) = \frac{1}{1+\exp(a(t-t_0))} + \frac{1}{1+\exp(a(t+t_0))}$	$t_0 = 19,1$
Comerciais leves (diesel)		$t_0 = 15,3$

Fonte: BRASIL/MMA, 2014

Os parâmetros definidos para as curvas de sucateamento de automóveis e veículos comerciais leves do ciclo Otto, apresentados na Tabela 4, foram calibrados pelo Serviço de Planejamento da Petrobras a partir dos dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (Pnad) de 1988. Para os veículos comerciais leves do ciclo diesel e ônibus, os parâmetros foram calculados a partir de dados de idade média e de frota total fornecidos pelo Departamento Nacional de Trânsito (Denatran) para o ano de 1997. Em ambos os casos, trata-se dos mesmos parâmetros adotados no Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (BRASIL/MMA, 2014). A curva de sucateamento para motocicletas,⁴ por sua vez, foi definida com base nos dados disponibilizados pelo Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores (Sindipeças) (PINTO, 2010).

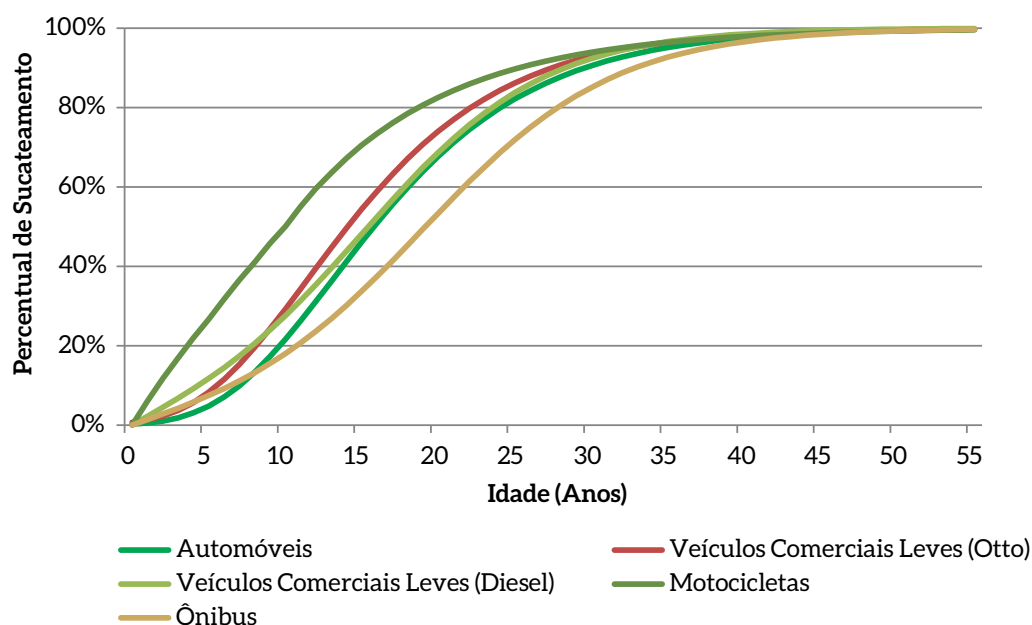


Figura 13 – Curva de Sucateamento de Autoveículos no Transporte de Passageiros

Fonte: BRASIL/MMA, 2014

4 Motos de até 200 cilindradas: 6% nos 5 primeiros anos; 7% do 6º ao 8º ano, 8% do 9º ao 10º ano e 10% do 11º ano em diante. Motos acima de 200 cilindradas: 4% nos 5 primeiros anos; 5% do 6º ao 10º ano, 6% do 11º ao 15º ano e 8% do 16º ano em diante.

No período compreendido entre 2002 e 2012, a frota circulante destinada ao transporte de passageiros mais que dobrou seu tamanho, passando de aproximadamente 22 milhões para 45 milhões de veículos, incluindo automóveis, veículos comerciais leves, motocicletas e ônibus, como exibido na Tabela 5. O crescimento se deu majoritariamente pelo aumento das vendas de automóveis e motocicletas no período em análise.

Tabela 5 – Frota Veicular Rodoviária – Transporte de Passageiros⁵

Ano	Automóveis	Comerciais Leves (Otto)	Comerciais Leves (Diesel)	Motocicletas	Ônibus Urbanos	Ônibus Rodoviário
2002	16.329.192	2.021.338	709.782	4.257.204	219.344	24.374
2003	16.754.231	2.034.824	728.038	4.923.924	226.199	25.135
2004	17.322.114	2.086.607	755.021	5.650.746	232.385	25.822
2005	17.927.819	2.144.795	790.234	6.486.733	236.350	26.804
2006	18.684.055	2.218.981	828.337	7.466.206	244.590	27.626
2007	19.822.020	2.369.546	872.589	8.700.931	255.331	29.029
2008	21.139.550	2.595.162	943.748	10.259.323	269.839	30.075
2009	22.698.900	2.861.944	1.020.981	11.112.636	280.080	30.547
2010	24.386.459	3.235.243	1.128.727	12.195.227	294.959	31.777
2011	26.031.965	3.666.446	1.258.381	13.506.021	314.604	33.972
2012	27.832.543	4.095.835	1.380.547	14.276.337	328.485	35.526

Fonte: Elaboração própria a partir de ANFAVEA, 2015; BRASIL/MMA, 2014

Apesar do significativo crescimento da frota veicular nacional, observa-se que, nos países em desenvolvimento, as frotas ainda se encontram longe do ponto de saturação. O Brasil apresenta taxa de motorização⁶ média da ordem de 18 veículos por cada cem habitantes, significativamente inferior à dos países desenvolvidos e mesmo de alguns países em desenvolvimento (ANFAVEA, 2015), como apresentado na Figura 14. Existe, portanto, espaço para crescimento da indústria automotiva brasileira na medida em que a economia se desenvolva e ocorra maior distribuição de renda entre a população. Surge também a preocupação com a adoção de tecnologias adequadas, melhoras dos índices de eficiência energética, uso de combustíveis menos poluentes e alternativas de intermodalidade.

⁵ Os micro-ônibus (veículos para até 20 passageiros) foram contabilizados na categoria ônibus urbanos.

⁶ Na literatura, a taxa de motorização é comumente referida como a razão entre número de veículos e número de habitantes de determinada região ou de determinado país. Desse modo, estabelece-se um índice que relaciona a população com a frota circulante. Esse índice é de extrema importância para planejadores de políticas de transporte e mobilidade urbana, pois influencia a elaboração de projetos em diversos setores, como estrutura viária, meio ambiente e previsão da demanda para setores da economia.

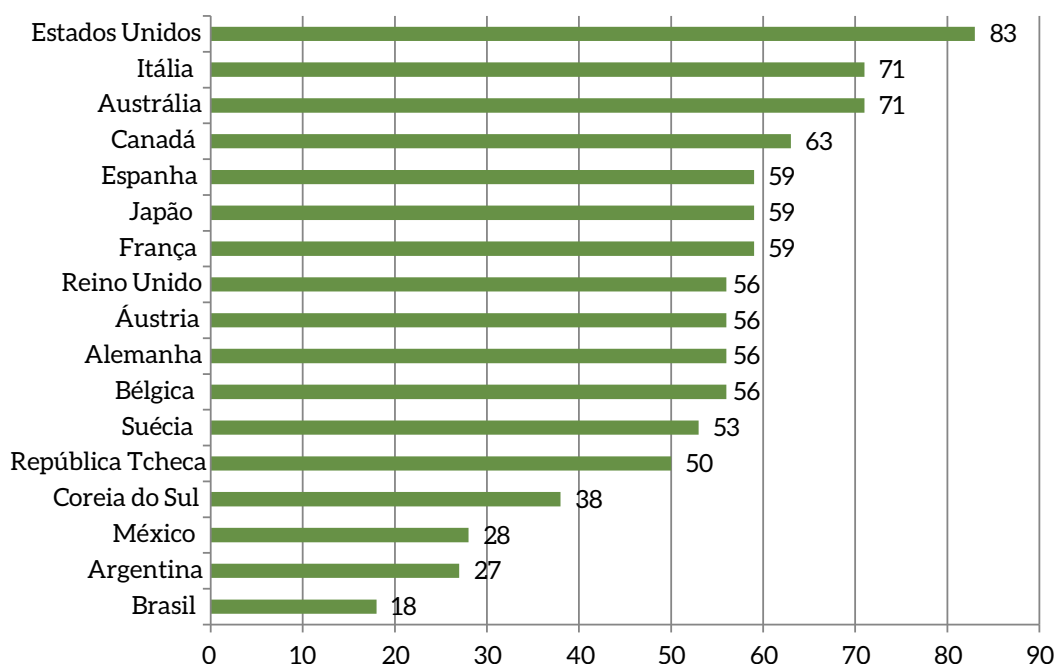


Figura 14 – Taxa de Motorização (Veículos por 100 Habitantes)

Fonte: Elaboração própria a partir de ANFAVEA, 2015

Cumprir destacar que a frota informada pelo Denatran, que permite avaliar características da evolução da frota de veículos em diferentes regiões do país, se mostra superior às estimativas realizadas pela Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Anfavea) e pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA). A divergência de dados do Denatran em relação às demais estimativas deve-se possivelmente aos veículos que já deixaram de circular e para os quais o respectivo registro não foi cancelado.

Segundo dados do Denatran, em dezembro de 2012, mais de 71% da frota brasileira de veículos⁷ concentravam-se nas regiões Sudeste e Sul. Na região Sudeste, São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro representavam respectivamente 31,28%, 11,05% e 7,14% da frota brasileira licenciada. Já na região Sul, Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina detinham respectivamente 7,63%, 7,20% e 5,03% da frota licenciada (BRASIL/DENATRAN, 2014).

Por outro lado, as regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, para o período em análise, apresentaram um crescimento médio de licenciamentos de 223% contra um crescimento de aproximadamente 100% da frota nas regiões Sudeste e Sul. Em particular, os estados do Maranhão, Tocantins, Amapá, Pará e Pernambuco apresentaram os maiores índices de licenciamento do Brasil (BRASIL/DENATRAN, 2014). O aumento expressivo nesses estados está relacionado à demanda reprimida na região e ao aumento da renda média da população.

⁷ Considerando as categorias definidas no Anexo I do Código Brasileiro de Trânsito (CBT) com características voltadas para o transporte de passageiros (automóvel, caminhonete, camioneta, motocicleta, ônibus e utilitário) no mês de dezembro de 2012.

Considerando-se os dados de venda de veículos e as curvas de sucateamento, pode-se estimar que cerca de 60% da frota destinada majoritariamente ao transporte de passageiros têm até cinco anos de idade, e cerca de 80%, até dez anos de idade, conforme apresentado na Figura 15.

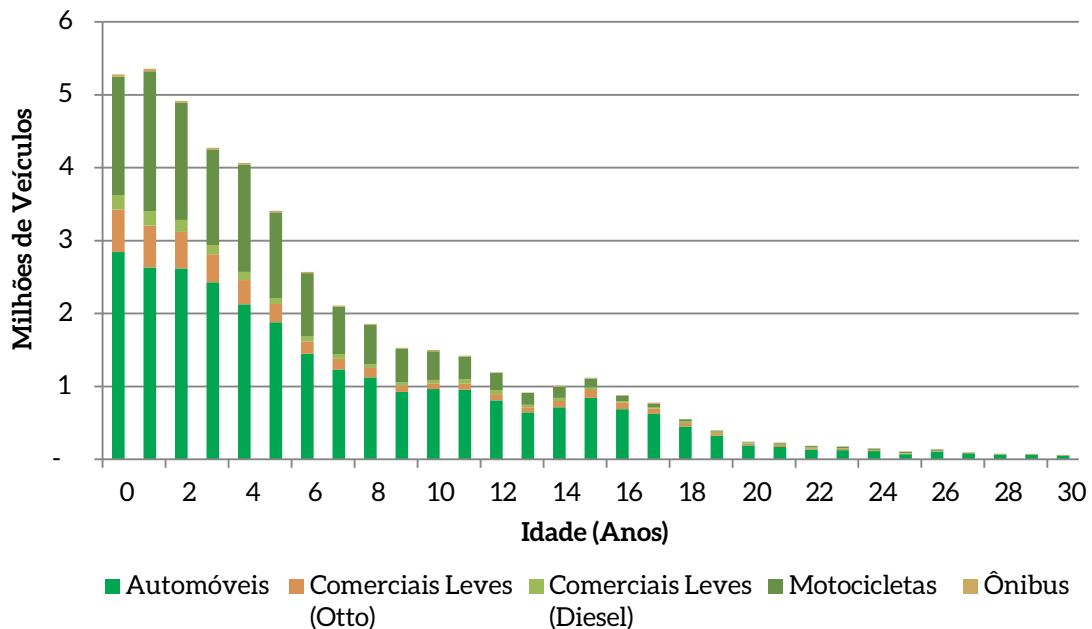


Figura 15 – Idade Média da Frota em 2012 – Transporte de Passageiros

Fonte: Elaboração própria

Com base nos microdados da Pnad, pode-se verificar o percentual de residências que têm ao menos um automóvel e/ou motocicleta por unidade da Federação. Em 2012, incluindo todos os tipos de domicílios pesquisados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), os percentuais de domicílios em que ao menos um morador possuía carro e/ou bicicleta foram de 52,27%. Regionalmente, observa-se que, nas regiões Norte e Nordeste, as proporções de domicílios que possuíam motocicleta eram maiores que as dos domicílios que possuíam carro, como se pode verificar na Figura 16. A disparidade entre os índices de posse de veículo nos diferentes estados reflete as diferenças socioeconômicas do Brasil e reforça a ideia de que o país ainda se encontra longe do ponto de saturação do mercado.

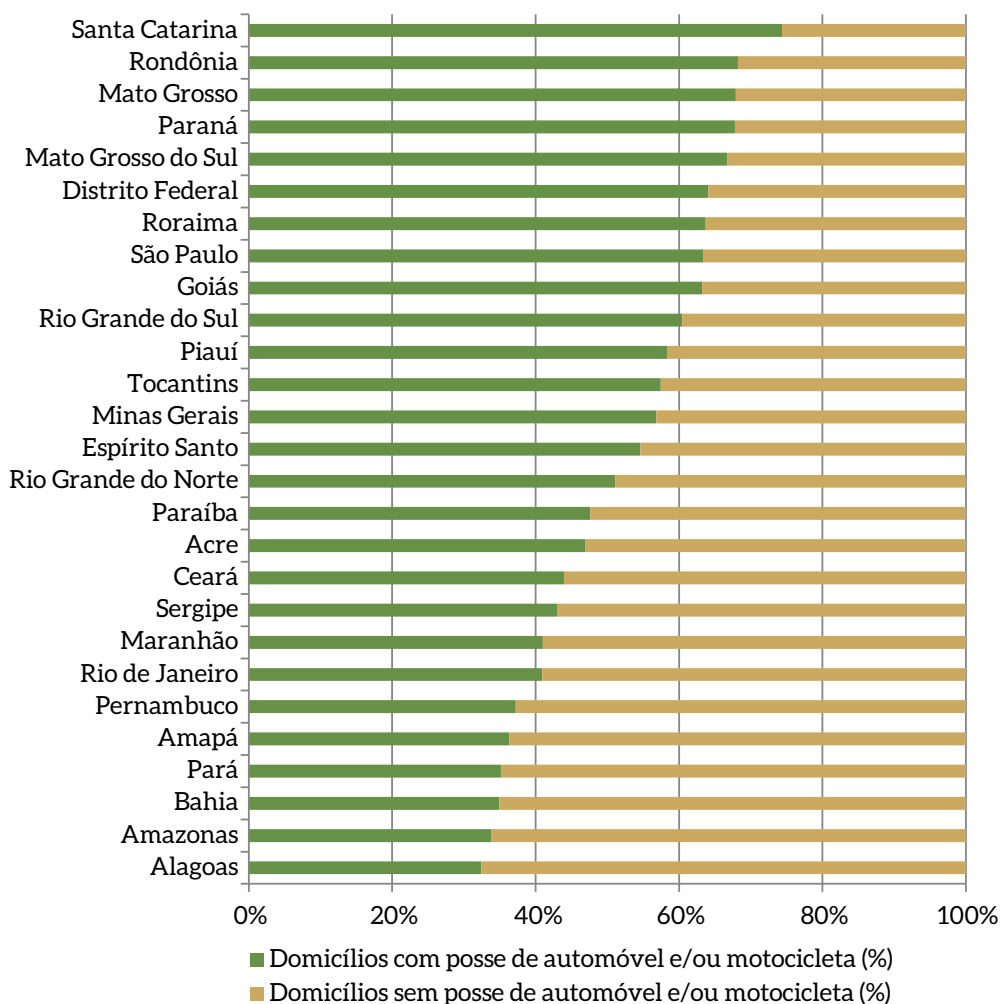


Figura 16 – Posse de Automóveis e/ou Motocicleta por Unidade Federativa

Fonte: BRASIL/IBGE, 2012

A intensidade de uso do veículo, ou seja, a quantidade de quilômetros percorrida, está associada à idade do veículo e permite estimar a distância média percorrida da frota em quilômetros por ano, como exibido na Figura 17. A redução da quilometragem média anual dos veículos em função da idade pode ser atribuída a um efeito renda, pois os hábitos e o padrão de vida dos proprietários de veículos mais velhos tendem a ser mais restritivos em termos de viagens e deslocamentos, haja vista que a parcela do orçamento familiar alocada ao consumo de combustível tende a ser menor.

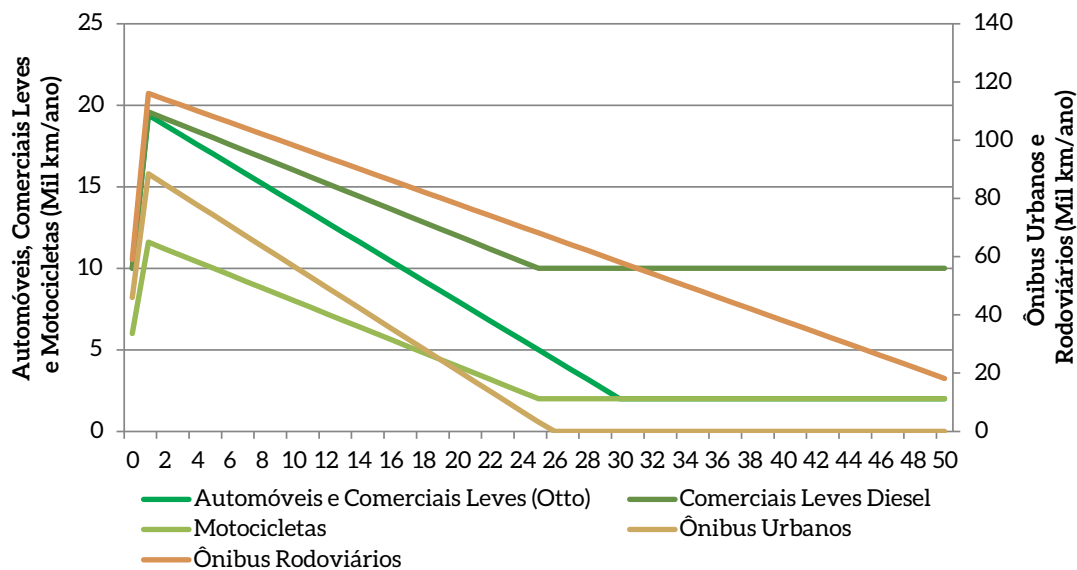


Figura 17 – Intensidade de Uso – Transporte de Passageiros

Fonte: BRASIL/MMA, 2014

A distância média percorrida por veículos no transporte individual está associada a um conjunto de fatores socioeconômicos do proprietário do veículo e tem impacto direto no consumo de combustível. Uma das primeiras pesquisas envolvendo a distância média percorrida por veículos no Brasil relaciona a distância percorrida por ano com a idade do veículo (MURGEL, 1990). Nessa pesquisa, observa-se que a quilometragem média da frota do estado de São Paulo para veículos com menos de um ano corresponde a 22.000 km/ano. Para veículos com mais de 11 anos, a quilometragem média percorrida é reduzida para aproximadamente 9.000 km/ano. Utilizando-se os dados de idade média da frota e intensidade de uso (BRASIL/MMA, 2014), obtêm-se valores compatíveis com a pesquisa de Murgel (1990).

Para a frota de ônibus, tanto para transporte urbano quanto para transporte interurbano, verifica-se a elevada distância média percorrida em função da natureza comercial do uso desses veículos que usualmente dispõem de um motorista exclusivo para condução em jornadas periódicas e trajetos já definidos. Os resultados obtidos neste relatório estão em consonância com os dados do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários de 2013.

Tabela 6 – Quilometragem Média Percorrida por Veículo ao Ano

Categoria	Quilometragem Média Percorrida (km)
Automóveis	14.590
Veículos comerciais leves (Otto)	15.030
Veículos comerciais leves (diesel)	16.145
Motocicletas	9.440
Ônibus urbanos	56.916
Ônibus rodoviários	95.257

Fonte: Elaboração própria a partir de ANFAVEA, 2015; BRASIL/MMA, 2014

A partir da estimativa de distância média percorrida e do consumo específico da frota, pode-se estimar o volume de combustível consumido para atender a demanda de transporte de passageiros no Brasil. As informações utilizadas de eficiência, quilometragem por litro de combustível, para o transporte de passageiro são oriundas de uma compilação de dados de fabricantes, associações de fabricantes de veículos automotores, organismos estaduais e outras entidades de pesquisa (BRASIL/MMA, 2014).

Tabela 7 – Consumo de Combustível no Transporte de Passageiros

Ano	Gasolina A (10 ³ m ³)	GNV (10 ⁶ m ³)	Etanol Anidro (10 ³ m ³)	Etanol Hidratado (10 ³ m ³)	Diesel (10 ³ m ³)
2002	16.983	980	5.661	4.270	6.897
2003	17.686	1.328	5.895	3.934	8.920
2004	18.202	1.580	6.067	4.029	9.427
2005	18.330	1.945	6.110	4.994	9.243
2006	18.092	2.307	6.031	6.818	9.350
2007	17.869	2.559	5.956	9.447	9.829
2008	17.764	2.453	5.921	12.794	10.347
2009	18.476	2.106	6.159	15.148	9.953
2010	20.998	2.008	6.999	14.675	10.497
2011	25.184	1.972	8.395	11.396	11.166
2012	28.125	1.942	9.375	10.603	10.832

Fonte: Elaboração própria a partir de ANFAVEA, 2015; BRASIL/MMA, 2014

A maior parte do volume de combustível consumido no transporte de passageiros está associada à categoria automóvel, em particular ao transporte individual de passageiros, que, na última década, sofreu rápida expansão.

Urge, assim, um planejamento adequado para o setor de transporte rodoviário brasileiro de modo que se conjugue a demanda de combustíveis com o crescimento sustentável no longo prazo. Com o planejamento, podem-se estabelecer iniciativas que visam ao desenvolvimento de tecnologias com maior eficiência, maior penetração de combustíveis renováveis e melhores políticas de mobilidade urbana que resultem em redução das emissões de GEE e maior eficiência do setor.

1.2.2 TRANSPORTE DE CARGA

O transporte rodoviário tem sido o modal preferencial na movimentação de cargas no Brasil. Conforme discutido anteriormente, a participação do transporte rodoviário é da ordem de 52% na matriz brasileira em relação à quantidade de TKU transportada (BRASIL/SPNT, 2012).

O aumento da participação de bens de médio a alto valor agregado necessita de transporte rápido e flexível nas entregas, o que contribui para o aumento da importância das rodovias em relação a modais como o aquaviário e o ferroviário (GUCWA; SCHÄFER, 2013). Dessa forma, o modal rodoviário deveria ser focado no transporte de tais produtos, com pequenos volumes e em rotas de curtas distâncias. No entanto, o que se observa no Brasil é que, devido ao baixo valor do frete, acaba sendo bastante utilizado também no transporte de *commodities* como soja, derivados de petróleo e cimento (ARAÚJO; BANDEIRA; GOUVEA, 2014).

Além do fato de o valor médio pago pelos fretes rodoviários ser mais baixo que os custos incorridos, outros grandes fatores que influenciam a preferência pela modalidade rodoviária são: malha rodoviária bastante pulverizada; prática de excesso de carga, o que acarreta a destruição da malha rodoviária nacional e maiores custos de manutenção (ARAÚJO; BANDEIRA; GOUVEA, 2014); frequência e disponibilidade do serviço; velocidade e comodidade inerentes ao serviço de porta a porta, sem necessidade de carga ou descarga entre origem e destino (BALLOU, 2006).

Atualmente, participam do mercado brasileiro de transporte rodoviário 153 mil empresas de transporte de cargas, 785 mil autônomos e 384 cooperativas, dentre os transportadores regularmente inscritos no Registro Nacional de Transportador de Carga (RNTC) (BRASIL/ANTT, 2014c). Entre 2002 e 2012, a frota de caminhões cresceu aproximadamente 5% ao ano, passando de 1,2 milhão para 1,9 milhão de veículos. Do total de caminhões, 43% são compostos por comerciais leves, caminhões semileves e leves, isto é, caminhões que circulam predominantemente em regiões urbanas, percentual que se manteve constante durante todo o período. No entanto, em 2012, a participação dos caminhões semipesados e pesados passou de 35% para 45%, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Frota Veicular Rodoviária – Transporte de Carga

Ano	Comerciais Leves ⁸	Caminhões Semileves	Caminhões Leves	Caminhões Médios	Caminhões Semipesados	Caminhões Pesados
2002	157.729	24.043	323.332	259.699	262.188	149.342
2003	161.786	29.129	327.043	255.232	267.281	161.551
2004	167.782	35.763	332.783	251.035	277.623	180.363
2005	175.607	42.404	337.933	246.765	288.461	195.262
2006	184.075	48.853	342.275	243.722	296.118	207.742
2007	193.909	55.795	349.588	242.496	311.743	228.061
2008	209.722	63.001	359.146	241.996	335.511	258.882
2009	226.885	67.669	368.953	240.999	355.881	281.029
2010	250.828	72.788	386.994	242.711	390.850	323.130
2011	279.640	78.296	409.559	244.367	432.735	365.489
2012	306.788	82.219	425.296	243.913	461.376	394.482

Fonte: Elaboração própria a partir de ANFAVEA, 2015; BRASIL/MMA, 2014

Cabe destacar que, ao longo deste estudo, considera-se que apenas 20% das vendas de comerciais leves do ciclo diesel são destinados à movimentação de bens, de modo a fazer uma correspondência mais adequada com o total da frota destinada ao transporte de carga apresentado por outras fontes oficiais – ANTT e Anfavea –, segundo as quais a frota gira em torno de 2 milhões de veículos. Se levado em consideração que todos os veículos comerciais leves a diesel são utilizados no transporte de carga, a frota total para o transporte de carga no Brasil ultrapassa 3,1 milhões de veículos. Todavia, tal estimativa não condiz com a realidade brasileira, na qual uma expressiva parcela dos veículos comerciais leves é utilizada apenas para o transporte de passageiros, apesar da flexibilidade inerente desse tipo de veículo para a movimentação de bens pelas estradas.

Os valores da frota de caminhões para o período 2002-2012 foram estimados pelo inventário do Ministério do Meio Ambiente (MMA), utilizando dados de vendas disponibilizados pela Anfavea e a curva de sucateamento desenvolvida pelo próprio ministério. A frota de comerciais leves, por sua vez, é estimada pelo presente estudo. A Tabela 9 apresenta a evolução de licenciamentos totais de autoveículos novos utilizados para o transporte de carga no Brasil. Conforme mencionado, a quantidade de vendas para a categoria de comerciais leves considera apenas 20% dos valores disponibilizados pela Anfavea.

⁸ Considera apenas comerciais leves do ciclo diesel.

Tabela 9 – Vendas de Veículos – Transporte de Carga

Ano	Comerciais Leves	Caminhões Semileves	Caminhões Leves	Caminhões Médios	Caminhões Semipesados	Caminhões Pesados
2002	12.868	7.304	19.427	9.907	15.276	13.972
2003	10.946	5.875	17.839	8.486	16.882	17.209
2004	13.249	7.577	20.137	8.642	22.364	24.285
2005	15.491	7.782	19.854	8.448	23.222	21.028
2006	16.591	7.795	19.329	9.538	20.416	19.180
2007	18.435	8.492	22.553	11.240	28.676	27.537
2008	24.928	8.981	25.385	11.888	37.321	38.774
2009	26.928	6.680	25.793	11.503	34.772	31.125
2010	34.400	7.310	34.333	14.173	49.980	51.898
2011	40.123	7.895	39.453	14.052	57.954	53.517
2012	39.441	6.522	33.343	11.852	45.881	41.549

Fonte: ANFAVEA, 2015; MMA, 2014

Para a construção da curva de sucateamento, foram adotados os parâmetros do inventário do MMA para comerciais leves e caminhões, apresentados na Tabela 10 e exibidos na Figura 18.

Tabela 10 – Curvas de Sucateamento por Categoria de Veículos – Transporte de Carga

Categoria	Função de Sucateamento $S(t)$ - fração de veículos remanescentes na idade t	Parâmetros
Caminhões	$S(t) = \frac{1}{1 + \exp(a(t - t_0))} + \frac{1}{1 + \exp(a(t + t_0))}$	$a = 0,10; t_0 = 17$
Comerciais leves (diesel)		$a = 0,17; t_0 = 15,3$

Fonte: BRASIL/MMA, 2014

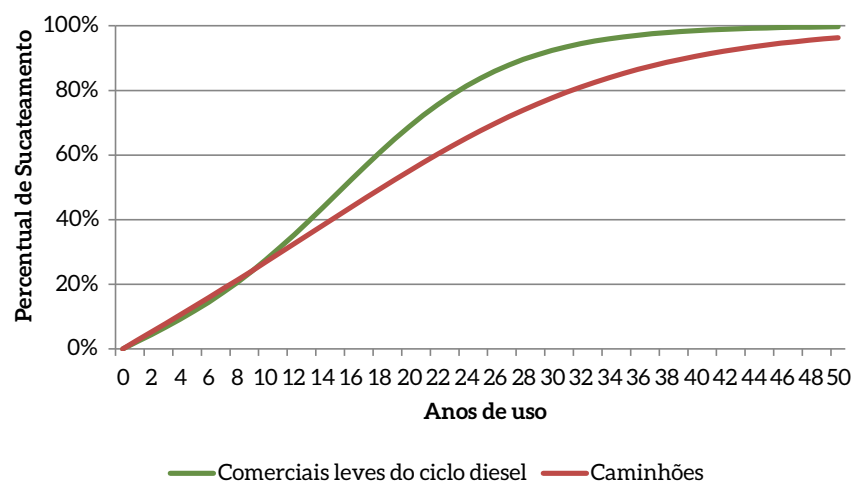


Figura 18 – Curvas de Sucateamento – Transporte de Carga

Fonte: BRASIL/MMA, 2014

Um fator importante relacionado à eficiência no consumo de combustível é a idade dos caminhões. A distribuição da frota por idade dos veículos utilizados no transporte de carga em 2012 é exibida na Figura 19 e foi estimada a partir da curva de sucateamento e do histórico de venda dos veículos.

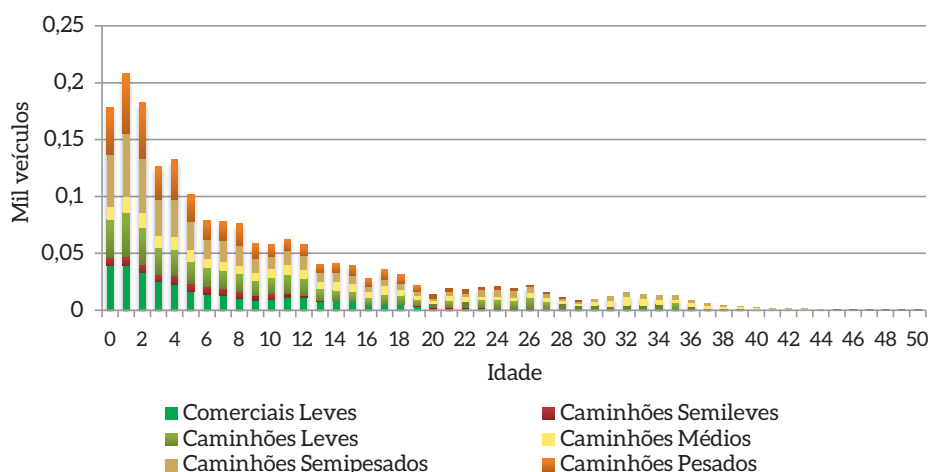


Figura 19 – Distribuição da Frota por Idade

Fonte: Elaboração própria a partir de ANFAVEA, 2015; BRASIL/MMA, 2014

Pode-se verificar que os caminhões semipesados e médios são os que apresentam idade mais avançada nas categorias de veículos de carga, com uma média ponderada de cerca de 11,1 e 15,4 anos, respectivamente. Tais estimativas estão condizentes com dados de idade média dos veículos de transporte de carga por tipo de veículo, apresentados pelo RNTC, da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), conforme mostra a Tabela 11.

Tabela 11 – Idade Média dos Veículos de Transporte de Carga no Brasil

	Autônomo	Empresa	Cooperativa	Total
Caminhão leve (3,5t A 7,99t)	20,1	9,2	10,4	13,2
Caminhão simples (8t A 29t)	23,6	10,7	15,9	16,7
Caminhão trator	18	7,7	13,6	13,1
Caminhão trator especial	15,5	4,9	9,8	10,1
Caminhonete/Furgão (1,5t A 3,49t)	10,1	6,6	7,5	8,1
Reboque	19,6	12,1	16,1	15,9
Semirreboque	15	8,5	10,8	11,4
Semirreboque com 5ª roda/Bitrem	9,7	6,6	5,4	7,2
Semirreboque especial	13,8	7,3	8,7	9,9
Utilitário leve (0,5t A 1,49t)	13,2	7,2	9,9	10,1
Veículo operacional de apoio	25,7	17,4	10,3	17,8
Total	16,8	8,9	10,8	12,1

Fonte: BRASIL/ANTT, 2014c

Conforme apresentado, a idade média de um caminhão é de aproximadamente 12,1 anos. As idades mais avançadas apresentadas estão entre os veículos de transportadores autônomos, podendo chegar a quase 26 anos nos tipos de veículos mais antigos.

A idade média de 12,1 anos está consideravelmente acima da vida econômica – ponto de custo total mínimo – estimada para a frota brasileira de caminhões, que é de cerca de oito anos (PEREIRA, 2006). Esse avanço na idade impede que alguns veículos tenham acesso às novas tecnologias existentes dedicadas a ganhos de eficiência. A operação de veículos mais antigos acarreta ônus financeiro e ambiental bastante significativo pelo fato de empregarem tecnologias defasadas, poluidoras e pouco eficientes quando se trata de consumo energético. Esses veículos tornam-se mais representativos na emissão de CO₂ e outros poluentes pela frota rodoviária (CRUVINEL; PINTO; GRANEMANN, 2012).

Além de consumirem mais combustível (e assim emitirem mais poluentes), veículos mais antigos necessitam de mais peças e se tornam mais propícios a acidentes, uma vez que seus componentes desgastados muitas vezes são mantidos em uso durante a operação até a exaustão, o que contribui para o agravamento do trânsito em caso de quebra ou acidente. Caminhões com mais de 20 anos estão envolvidos em grande parte dos acidentes e congestionamentos nas regiões metropolitanas. Estima-se que o custo social subjacente à frota brasileira autônoma é de pelo menos R\$ 40,0 mil por caminhão/ano. Esse custo corresponde a mais de 26% do preço de um caminhão novo. No entanto, não há incentivos para a renovação da frota por parte dos usuários, já que caminhões com mais de 20 anos são isentos de Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores (IPVA) no Brasil e quanto mais novo o caminhão, maior é o valor do IPVA (VELLOSO, 2012). Pode-se afirmar que caminhões velhos geram custos extras à sociedade, que passa a dispor de fretes relativamente mais altos (MOURA; ROCHA; RONCHI, 2013).

O governo brasileiro tem ciência dos problemas acarretados pela idade avançada da frota de caminhões no país e vem adotando políticas públicas com o objetivo de contorná-los. Para tanto, implementou ações específicas e com prazo limitado para financiamento na aquisição de veículos (novos ou usados), como o Modercarga-BNDES, criado em 2004, que fracassou devido ao alto custo do empréstimo e às altas exigências de garantias conversíveis em dinheiro que assegurassem a liquidação do empréstimo. Em 2009, lançou o Procaminhoneiro, com os mesmos vícios que o programa anterior (RONCHI; MOURA; ROCHA, 2013). Políticas eficientes de renovação da frota de caminhões são necessárias para garantir melhor eficiência energética, o que leva a menor emissão de gases poluentes e maior eficiência econômica, além de proporcionar maior segurança nas ruas e estradas.

Apesar de as informações acerca da intensidade de uso dos caminhões serem incertas, a Figura 20 apresenta as curvas de intensidade de uso para veículos pesados realizadas pelo MMA, com base em informações levantadas pela Anfavea em 2008 e pela Petrobras em 2010. A sua elaboração adota a hipótese de decaimento de uso com o avanço da idade dos veículos de modo similar ao que ocorre aos veículos do ciclo Otto.

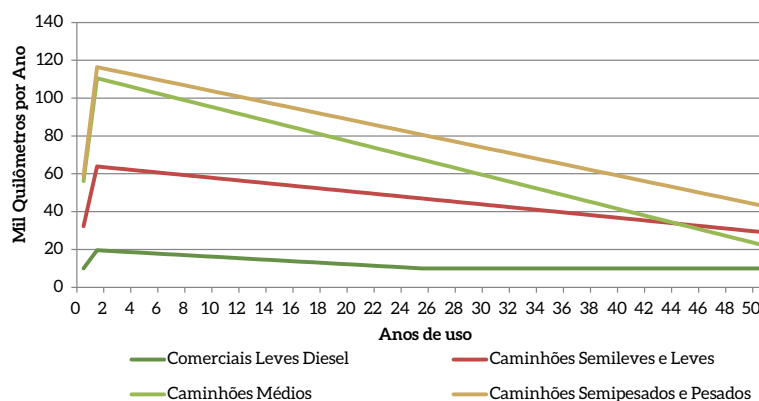


Figura 20 – Intensidade de Uso – Transporte de Carga

Fonte: BRASIL/MMA, 2014

A partir dos valores de intensidade de uso apresentados e considerando a quantidade de veículos existentes por anos de uso da Figura 20, é feita uma média ponderada da quilometragem anual percorrida para cada categoria de veículo. Chega-se, assim, ao resultado apresentado pela Tabela 12.

Tabela 12 – Quilometragem Média Percorrida por Veículo ao Ano

Categoria	Quilometragem Média Percorrida (km)
Comerciais leves	16.144,70
Caminhões semileves	57.631,92
Caminhões leves	54.211,19
Caminhões médios	82.055,59
Caminhões semipesados	98.486,83
Caminhões pesados	102.131,68
Geral	72.352,97

Fonte: Elaboração própria a partir de ANFAVEA, 2015; BRASIL/MMA, 2014

Conforme já mencionado, a distância percorrida pelos caminhões nas operações de transporte de carga ainda é um dado bastante incerto. Pesquisa conduzida pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) em conjunto com o Serviço Social do Transporte (Sest) e o Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte (Senat) apresenta um valor médio percorrido muito superior ao calculado acima e indica que os caminhões no Brasil percorrem, em média, cerca de 10.400 km por mês, o que corresponde a um total de 125 mil km por ano.

Tabela 13 – Distância Média Percorrida pelos Caminhoneiros em Julho de 2011

Quilômetros rodados por mês (km)	Autônomos	Empregados de Frota	Total
Média	9.842	11.426,9	10.482

Fonte: CNT/SEST/SENAR, 2011

Para essa distância média percorrida, aproximadamente 90% dos caminhoneiros rodam predominantemente a uma velocidade média superior a 60 km/h, conforme apresentado pela Tabela 14.

Tabela 14 – Velocidade Média Predominante em Julho de 2011

Velocidade Média Predominante	Autônomos (%)	Empregados de Frota (%)	Total (%)
Abaixo de 60 Km/h	10	8,4	10
Acima de 60 Km/h	90	91,6	90

Fonte: CNT/SEST/SENAR, 2011

Os dados de quilometragem por litro de combustível para veículos do ciclo diesel são calculados pelo MMA com base nas mesmas informações da Anfavea e da Petrobras. Desse modo, o consumo específico por categoria de veículo de carga é exibido na Tabela 15.

Tabela 15 – Quilometragem por Litro e Consumo Específico de Diesel por Categoria de Veículo

	Consumo específico de diesel (L_{diesel}/100 km)	Quilometragem por litro (km/L_{diesel})
Comerciais leves	10,5	9,5
Caminhões semileves	11	9,1
Caminhões leves	18	5,6
Caminhões médios	18	5,6
Caminhões semipesados	29	3,4
Caminhões pesados	29	3,4

Fonte: BRASIL/MMA, 2014

Uma vez que quanto maior a escala da frota, menor é a sua intensidade energética, ou seja, menos combustível é consumido para transportar a mesma carga (GUCWA; SCHÄFER, 2013), expandir a capacidade de carga dos caminhões em termos de volume e massa implica reduzir a intensidade de energia, desde que a capacidade adicional seja bem utilizada.

Uma comparação entre o desempenho dos 18 veículos de carga mais pesados em nove países (ITF/OECD, 2010) permitiu concluir que veículos de maior capacidade podem reduzir significativamente as emissões de CO₂ por TKU. Segundo Woodrooffe e Ash (2001), o uso de veículos combinados em vez de veículos de reboque único tem apresentado redução das emissões de GEE diretos em até 32% (IPCC, 2014).

No entanto, outra variável que deve ser levada em consideração é o perfil da entrega. Conforme mencionado no início desta seção, bens de médio a alto valor agregado vêm aumentando sua participação no mercado e, assim, cresce também a necessidade de flexibilidade e velocidade nas entregas, de modo que os transportadores consigam atender a um alto nível de serviço, ou seja, alta qualidade de serviço associada à confiabilidade de entrega, e manter sua competitividade no mercado. Para esses casos, veículos mais leves são mais indicados por apresentarem a devida flexibilidade para atender a essas exigências.

Conclui-se, então, pelos critérios de eficiência energética e nível de serviço, que veículos pesados são destinados a distâncias longas, e veículos automotores do tipo leve e comercial são mais empregados nas entregas urbanas, de curtas distâncias (DUTRA, 2004).

No modal rodoviário de carga, o combustível utilizado é essencialmente óleo diesel. A Tabela 16 apresenta a evolução no uso desse combustível pelas diferentes categorias de veículos. Para a obtenção desses valores, são utilizados os dados de consumo específico disponibilizados pelo inventário (Tabela 15), intensidade de uso (Figura 20) e frota por idade (Figura 19).

Tabela 16 – Consumo Anual de Óleo Diesel por Tipo de Veículo (em mil m³)

Ano	Comerciais Leves	Caminhões Semileves	Caminhões Leves	Caminhões Médios	Caminhões Semipesados	Caminhões Pesados
2002	273	136	3.141	3.849	7.407	4.538
2003	281	175	3.180	3.772	7.527	4.857
2004	288	215	3.221	3.688	7.763	5.336
2005	298	259	3.270	3.608	8.094	5.853
2006	312	302	3.312	3.541	8.376	6.258
2007	327	346	3.366	3.506	8.742	6.756
2008 ⁹	350	392	3.451	3.497	9.379	7.562
2009	381	429	3.550	3.491	10.087	8.385
2010	424	460	3.697	3.510	10.987	9.402
2011	478	492	3.915	3.554	12.240	10.746
2012	525	521	4.116	3.574	13.365	11.849

Fonte: Elaboração própria a partir de ANFAVEA, 2015; BRASIL/MMA, 2014

Não estão disponíveis dados oficiais referentes a carga, em TKU, transportada pelo modal rodoviário para os anos de 2011 em diante. Desse modo, utiliza-se uma série histórica disponibilizada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e projeta-se o valor da quantidade de carga transportada para os anos seguintes. A projeção é calculada pela multiplicação da distância média percorrida por veículo (conforme apresentado pela Tabela 6), a quantidade total de frota circulante da Tabela 8 e a carga transportada por veículo.

Dados disponibilizados pela Truk (2004) informam os valores de carga efetivamente transportada por tipo de veículo e faixa de idade. Adaptando esses valores para as classificações utilizadas pelo inventário do MMA e considerando como 2,5 toneladas a carga transportada por veículos leves, chega-se aos valores obtidos na Tabela 17.

⁹ A partir de 2008, entrou em vigor a Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005, que determina que todo óleo diesel nacional disponível ao consumidor final é acrescido de biodiesel.

Tabela 17 – Carga Média (em Toneladas) Transportada por Veículo por Categoria e Faixa de Idade

Faixa de Idade	Novo (menos de 2 anos)	Seminovo (entre 2 e 6 anos)	Usado (entre 6 a 10 anos)	Muito usado (entre 11 e 15 anos)	Velho (mais de 15 anos)
Comerciais leves	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Caminhões semileves	3,8	3,4	2,9	3	2,7
Caminhões leves	3,6	6,1	5,8	8,9	9
Caminhões médios	9,8	10,2	10	10,9	11,6
Caminhões semipesados	12,8	12,2	12,7	13,6	13,1
Caminhões pesados	27,2	25,9	24,8	23,9	23,1

Fonte: Elaboração própria a partir de BRASIL/MMA, 2014; TRUK, 2004

Para cada faixa de idade e categoria de caminhões, contabiliza-se a quantidade de veículos, segundo as curvas de sucateamento e os dados de vendas anuais. Multiplicando essa quantidade de veículos pela intensidade de uso, é possível obter a quilometragem total rodada pela frota. O somatório dos produtos entre essa quilometragem total por tipo de veículo e faixa de idade pela sua capacidade de carga resulta no total de carga transportada ao ano.

Considerando os dados para 2010 e um fator de correção de 0,3 – que indica que os caminhões percorrem seus trajetos com apenas 30% de sua capacidade utilizada –, chegou-se a um valor de 609 bilhões de TKU transportados, número relativamente próximo aos 634 bilhões divulgados pela EPE. Dessa forma, é mantida a projeção para os anos posteriores, chegando ao resultado apresentado pela Tabela 18.

Tabela 18 – Carga Transportada pelo Modal Rodoviário

Ano ¹⁰	Carga Transportada (milhões de TKU)
2002	486.212
2003	495.232
2004	510.174
2005	523.213
2006	532.327
2007	548.955
2008	573.221
2009	593.024
2010	633.783
2011	667.872
2012	717.483

Fonte: Elaboração própria a partir de ANFAVEA, 2015; BRASIL/MMA, 2014; BRASIL/EPE, 2012a

¹⁰ Dados disponibilizados pela EPE até 2010. Foram realizadas projeções para 2010 a 2012, utilizando dados de frota total, distância média percorrida por veículo e carga média transportada por veículo estimada.

A Tabela 19 apresenta um levantamento dos produtos transportados pelo modal rodoviário, considerando dados disponibilizados pelo Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT) para 2011. Neste estudo, foi utilizada a participação de cada bem em cima do valor de TKU total transportado em 2011, apresentado na Tabela 18.

Tabela 19 – Produtos Transportados no Modal Rodoviário

Produto	TKU
Soja em grão	16.405,23
Óleo de soja em bruto e tortas, bagaços e farelo de soja	12.506,11
Milho em grão	22.924,72
Algodão herbáceo, café em grão, arroz beneficiado e produtos derivados	16.114,46
Produtos das usinas e do refino de açúcar	18.087,88
Álcool	21.961,95
Gasolina automotiva, gasoálcool, óleo combustível, óleo diesel	16.070,00
Outros produtos do refino de petróleo e coque	13.212,07
Cimento	19.769,35
Arroz em casca, trigo em grão e outros cereais, fumo em folha	24.178,15
Cana-de-açúcar, outros produtos e serviços da lavoura, mandioca, frutas cítricas	63.378,96
Produtos da exploração florestal e da silvicultura	43.543,55
Bovinos e outros animais vivos, leite de vaca e de outros animais, suínos vivos, aves vivas, ovos de galinha e de outras aves, pesca e aquicultura	57.539,49
Minério de ferro	3.777,04
Minerais metálicos não ferrosos	1.910,07
Minerais não metálicos	16.823,87
Abate e preparação de produtos de carne, carne de suíno fresca, refrigerada ou congelada, carne de ave fresca, refrigerada ou congelada	15.582,72
Óleo de soja refinado, farinha de trigo e derivados, farinha de mandioca e outros, óleos de milho, amidos e féculas vegetais e rações, café torrado e moído, café solúvel, produtos do fumo, papel, sucata	86.479,14

Produto	TKU
Celulose e outras pastas para fabricação de papel	3.627,74
Gás liquefeito de petróleo	6.039,99
Produtos químicos inorgânicos, produtos químicos orgânicos, fabricação de resina e elastômeros	44.892,00
Carvão mineral, gusa e ferroligas, semiacabados, laminados planos, longos e tubos de aço	10.282,17
Automóveis, camionetas e utilitários	1.802,20
Caminhões e ônibus	7.009,45
Artigos do vestuário e acessórios, preparação do couro e fabricação de artefatos – exclusive calçados, fabricação de calçados, produtos farmacêuticos, máquinas para escritório e equipamentos de informática, material eletrônico e equipamentos de comunicações, aparelhos/instrumentos médico-hospitalares, medida e óptico	4.761,22
Pescado industrializado, conservas de frutas, legumes e outros vegetais, outros óleos e gordura vegetal e animal – exclusive milho, leite resfriado, esterilizado e pasteurizado, produtos do laticínio e sorvetes, outros produtos alimentares, bebidas, beneficiamento de algodão e de outros têxteis e fiação, tecelagem, fabricação de outros produtos têxteis, produtos de madeira – exclusive móveis, jornais, revistas, discos e outros produtos gravados, defensivos agrícolas, perfumaria, sabões e artigos de limpeza, tintas, vernizes, esmaltes e lacas, produtos e preparados químicos diversos, artigos de borracha, artigos de plástico, outros produtos de minerais não metálicos, produtos da metalurgia de metais não ferrosos, fundidos de aço, produtos de metal – exclusive máquinas e equipamento, máquinas e equipamentos, inclusive manutenção e reparos, eletrodomésticos, máquinas, aparelhos e materiais elétricos, peças e acessórios para veículos automotores, outros equipamentos de transporte, móveis e produtos das indústrias diversas	119.192,54
Total	667.872,06

Fonte: BRASIL/SPNT, 2012

Conforme se observa, a participação de produtos agrícolas nesse modal é bastante expressiva, correspondendo a aproximadamente 54% do total de produtos transportados.

1.3 MODAL FERROVIÁRIO

A malha ferroviária brasileira sob concessão totaliza cerca de 28.190 km e, incluindo os trens urbanos de passageiros, chega-se a aproximadamente 30 mil km de extensão (BRASIL/ANTT, 2014d; CNT, 2013b). Conforme apresentado na Figura 21, a malha ferroviária nacional se concentra na região Sudeste e torna-se menos densa ao seguir para o Norte do país.

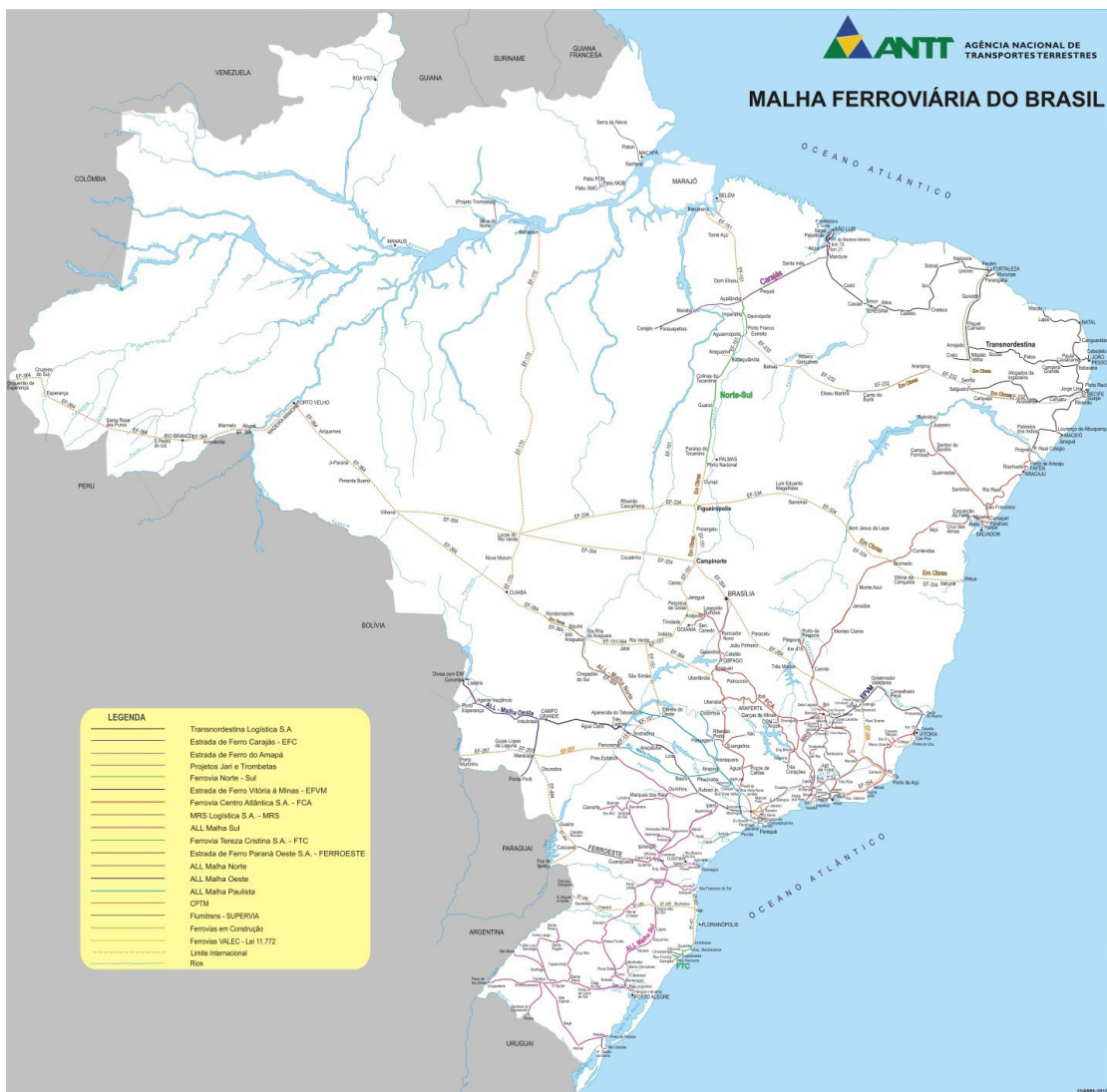


Figura 21 – Malha Ferroviária no Brasil

Fonte: BRASIL/ANTT, 2014d

A Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), criada em 2001, é responsável pelas atividades de concessão, fiscalização e regras de operação. O setor é predominantemente operado por empresas privadas que, juntas, representam mais de 95% da malha ferroviária, conforme a Tabela 20. Os contratos de concessão foram celebrados pela União entre 1996 e 1998, e também foram firmados contratos de arrendamento dos ativos provenientes da antiga Rede Ferroviária Federal S.A. (BRASIL/ANTT, 2014e).

Tabela 20 – Extensão da Malha Ferroviária Nacional Concedida

Operadoras Reguladas pela ANTT	Bitola ¹¹ (metros)			Total
	1,60	1,00	Mista	
América Latina Logística Malha Norte S.A. – ALLMN	754	–	–	754
América Latina Logística Malha Oeste S.A. – ALLMO	–	1.945	–	1.945
América Latina Logística Malha Paulista S.A. – ALLMP	1.463	243	283	1.989
América Latina Logística Malha Sul S.A. – ALLMS	–	7.254	11	7.265
Estrada de Ferro Carajás – EFC	892	–	–	892
Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A. – FERROESTE	–	248	–	248
Estrada de Ferro Vitória a Minas – EFVM	–	905	–	905
Ferrovia Centro-Atlântica S.A. – FCA	–	7.271	156	7.427
Valec/Subconcessão: Ferrovia Norte-Sul – FNS	720	–	–	720
Ferrovia Tereza Cristina S.A. – FTC	–	164	–	164
MRS Logística S.A. – MRS	1.632	–	42	1.674
Transnordestina Logística S.A. – TLSA	–	4.189	18	4.207
Total	5.461	22.219	510	28.190

Fonte: BRASIL/ANTT, 2014d

Por meio dos contratos para exploração do serviço público de transporte ferroviário, a União passou a arrecadar recursos e repassou ao setor privado a responsabilidade de realizar investimentos na manutenção da malha ferroviária. O reflexo desse processo pode ser observado no aumento da carga transportada, na redução dos índices de acidente, no aumento da quantidade de locomotivas e vagões em circulação e na evolução dos investimentos na malha ferroviária (BRASIL/ANTT, 2014d).

Apesar do aumento dos investimentos no setor, o Brasil ainda figura como um dos países com menores densidades de infraestrutura férrea no mundo. Além disso, somente 10% da malha brasileira estão em uso pleno, enquanto 7 mil km apresentam uso abaixo da capacidade total e 13 mil km encontram-se subutilizados (LIMA, 2013). A existência de trechos concedidos subutilizados ou mesmo abandonados, sem mapeamento, indica a necessidade de melhorar a eficiência e a gestão do transporte ferroviário.

Nos últimos anos, surgiu uma variedade de projetos voltados para o modal, sendo que alguns datam de décadas, mas ainda não haviam sido explorados. No entanto, devido a problemas nos prazos de licitação, execução e construção, muitos projetos apresentam atraso. Mesmo com um grande volume de recursos contemplados no PAC para as ferrovias, houve muitos problemas na execução de projetos: alguns não foram iniciados e outros ultrapassaram o orçamento estimado e tiveram seus prazos estendidos (CNT, 2013c). A Tabela 21 apresenta os atrasos decorrentes das principais obras do PAC para a expansão do modal ferroviário.

¹¹ Bitola é a largura determinada pela distância entre as partes internas das superfícies dos trilhos.

Tabela 21 – Levantamento das Principais Obras do Eixo Ferroviário do PAC

Projeto ¹²	Data Conclusão (Inicial)	Data Conclusão (Revisada)	Atraso (dias)
Norte-Sul – Trecho Norte	30/10/09	30/08/10	243
Norte-Sul – Trecho Sul	30/12/10	30/06/14	1278
Transnordestina	31/12/10	01/09/16	2072
Ferroanel SP – Norte ¹³	01/10/10	-	-
Ferronorte	30/12/10	30/06/13	1003
Oeste-Leste (bitola larga)	31/12/12	23/12/15	1087
Corredor Bioceânico ¹⁴	-	04/10/11	0
Ferrovia de Integração Oeste-Leste	23/12/15	31/12/15	8
Atraso médio	27	Meses	
Projetos com atraso	86%	de projetos atrasados	

Fonte: Elaboração própria a partir de BRASIL/MP, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013

1.3.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

A contribuição do transporte de passageiros sobre trilhos é fundamental para a melhoria das condições de vida da população, o aumento de produtividade e a redução dos impactos ambientais, principalmente em regiões onde o transporte rodoviário individual tem participação significativa.

Em contrapartida à ascensão no número de passageiros transportados pelo modal rodoviário, o transporte de passageiros por ferrovias tem decrescido constantemente, restando atualmente poucas linhas com condições regulares de funcionamento para trechos de longa distância. As ferrovias, que até o início da década de 1960 eram responsáveis em grande parte pelo transporte de passageiros de longa distância para ligações intermunicipais e interestaduais, perderam seu espaço (FERREIRA; CANTARINO, 2006).

Nos últimos anos, a retomada de investimentos e o suporte a programas de mobilidade nas principais regiões do país voltaram a sinalizar a importância do transporte sobre trilhos para comportar o aumento populacional nos grandes centros urbanos e facilitar integrações regionais. Contudo, nenhum novo sistema de transporte de passageiros sobre trilhos foi implantado desde 2010 no Brasil. Além disso, o aumento da rede foi de apenas 3,2% em 2012, comparado com 2011 (ANPTRILHOS, 2013).

¹² Não considera o projeto do trem de alta velocidade (TAV).

¹³ Segundo levantamentos, estão sendo procuradas alternativas à implementação do empreendimento Ferroanel, por isso ele não aparece mais nos balanços.

¹⁴ Não foi divulgada a primeira data prevista de conclusão, apenas que estava pronta no 2º balanço do PAC 2, correspondendo ao mês de setembro/2011. Esse balanço afirma que a data prevista era o dia 04/10/11. Considerou-se, então, que não houve atraso.

Não se concretizou a expectativa de que o setor privado pudesse revitalizar o modal ferroviário para o transporte de cargas e, conseqüentemente, atrair o transporte de passageiros. A concessão de linhas públicas para o transporte de cargas no setor privado promoveu políticas de recuperação da malha, metas de incremento de transporte, controle de acidentes e outros indicadores que antes, sob domínio estatal, não foram possíveis (FERREIRA; CANTARINO, 2006). Embora as concessões garantissem acesso a operadores interessados no transporte de passageiros, faltaram condições adequadas para fomentar o desenvolvimento dessa modalidade.

O quadro atual da malha ferroviária para o transporte de passageiros no país restringe-se a apenas três linhas de longa distância, sendo que o fluxo de uma delas é ancorado pelo setor turístico. Das três grandes linhas disponíveis, as duas mais importantes, ligando Vitória a Belo Horizonte e Carajás a São Luís, são mantidas pela mineradora Vale S.A., como exibido na Tabela 22.

Tabela 22 – Ferrovias Disponíveis para o Transporte de Passageiros

UF	Trecho	Extensão	Operadora
ES/MG	Vitória/Belo Horizonte Estrada de Ferro Vitória-Minas – EFVM	664 km	VALE S.A.
PA/MA	Parauapebas/São Luís Estrada de Ferro Carajás – EFC	892 km	
PR	Curitiba/Morretes/Paranaguá	110 km	Serra Verde Express Ltda.

Fonte: BRASIL/ANTT, 2014f

Entre as operadoras com transporte regular de passageiros de longa distância, observa-se que as duas maiores linhas em funcionamento são responsáveis pelo transporte de pouco mais de 1 milhão de passageiros por ano (Tabela 23). Entretanto, verifica-se também queda no transporte de passageiros por essas ferrovias, principalmente pela redução da demanda no trecho Vitória-Belo Horizonte.

Tabela 23 – Número de Passageiros Transportados (Milhões)

	Ano						
Concessionárias	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
EFVM	1,14	1,10	1,08	0,93	1,01	0,95	0,95
EFC	0,34	0,27	0,33	0,34	0,33	0,34	0,33
TOTAL	1,48	1,37	1,41	1,27	1,34	1,30	1,29

Fonte: BRASIL/ANTT, 2014d

O Programa de Investimento em Logística (PIL), lançado em 2012, inclui um conjunto de projetos para expansão ferroviária por meio de parcerias estratégicas com o setor privado, promovendo sinergias com modais rodoviário, ferroviário, portuário e aeroportuário. O PIL prevê investimentos da ordem de R\$ 100 bilhões com o objetivo de construir e melhorar a situação de 11 mil km de linhas férreas. O desenvolvimento das ferrovias do PIL poderá alavancar o desenvolvimento do transporte ferroviário mediante nova estrutura de concessão que separa a atividade de fornecimento da infraestrutura ferroviária e o serviço de transporte ferroviário (BRASIL/EPL, 2014b).

O Plano de Revitalização das Ferrovias, lançado pelo governo federal em 2003, estabeleceu quatro linhas¹⁵ mestras para o desenvolvimento da malha ferroviária brasileira, sendo uma delas voltada ao transporte ferroviário de passageiros. O Programa de Resgate do Transporte Ferroviário de Passageiros busca o desenvolvimento de condições para o retorno do transporte de passageiros às ferrovias com foco no atendimento de demandas regionais e interestaduais, entre cidades de alta concentração populacional.

O Grupo de Trabalho de Trens de Passageiros (GTTP), vinculado à ANTT, vem propondo ações para incrementar a participação do transporte ferroviário a partir de estudos e diagnósticos da malha ferroviária existente e das futuras concessões resultantes da malha que está sendo construída. Os estudos desenvolvidos pelo GTTP baseiam-se em 64 trechos possíveis para o transporte de passageiros a partir de estudo realizado pelo BNDES (BRASIL/ANTT, 2014g), como se pode verificar na Tabela 24.

Tabela 24 – Trechos com Potencial de Transporte de Passageiros por Região

Região	Trechos
Nordeste	21
Sul	12
Centro-Oeste	5
Sudeste (exceto SP)	12
Estado de São Paulo	14
Total	64

Fonte: BRASIL/ANTT, 2014g

A partir dos 64 trechos elencados pelo BNDES, todos utilizando a malha ferroviária atual, o governo federal definiu 14 trechos prioritários para a implantação do transporte de passageiros. A maior parte dos trechos ferroviários definidos como prioritários já tem estudos de viabilidade concluídos ou em fase de conclusão. O BNDES mapeou trechos, levando em consideração o porte ou a relevância dos municípios envolvidos,¹⁶ a extensão das linhas envolvidas,¹⁷ a ociosidade do trecho e a classificação dos possíveis trechos em interesses diversos.¹⁸

O corredor Rio-São Paulo representa um dos maiores desafios para o transporte ferroviário regional de passageiros. Disfunções desse trecho são oriundas, principalmente, de sua repartição modal, dado o esgotamento de capacidade em sua rede. O trem de alta velocidade (TAV) que deverá ligar a cidade do Rio de Janeiro a Campinas (SP), como apresentado na Figura 22, contribuirá para a solução de um cenário de saturação da Rodovia Presidente Dutra e reduzirá a pressão na infraestrutura aeroportuária tanto do Rio de Janeiro quanto de São Paulo (BRASIL/ANTT, 2014h).

15 Programa de Integração e Adequação Operacional das Ferrovias; Programa de Ampliação da Capacidade dos Corredores de Transportes; Programa de Expansão e Modernização da Malha Ferroviária; Programa de Resgate do Transporte Ferroviário de Passageiros.

16 Municípios com mais de 100 mil habitantes.

17 Trechos com no máximo 200 km de extensão.

18 Empresarial, turístico, desenvolvimento regional e desenvolvimento social.



Figura 22 – Traçado do Trem de Alta Velocidade

Fonte: ANPTRLHOS, 2014

Dada a escassez do transporte ferroviário regional, à exceção das ferrovias concedidas à Vale, o usuário não encontra alternativa aos modais rodoviário e aéreo nas ligações entre os principais estados e cidades brasileiras. Desse modo, o transporte ferroviário de passageiros fica restrito às grandes cidades e regiões metropolitanas na forma de trens ou metrô.

Atualmente, encontram-se em operação no Brasil 15 sistemas de transporte urbano sobre trilhos. Esses sistemas são operados por 15 empresas e distribuídos em 11 estados, mais o Distrito Federal. De 63 médias e grandes regiões metropolitanas do país, somente 12 dispõem de algum tipo de sistema de transporte sobre trilhos, totalizando menos de 20% de cobertura (ANPTRLHOS, 2013).

No ano de 2012, segundo dados da Associação Nacional dos Transportadores de Passageiros sobre Trilhos (ANPTrilhos), aproximadamente 2,6 bilhões de passageiros foram transportados por trens e/ou metrô, como exibido na Figura 23. O consumo de energia somado das operadoras de transporte sobre trilhos para o mesmo período foi da ordem de 1,8 GWh. Quando comparado com o consumo final de energia elétrica no Brasil em 2012, que foi de 494,4 TWh, constata-se que os valores consumidos pelo setor são irrisórios em face da importância do modal para a sociedade (BRASIL/EPE, 2014a). Estudos da ANPTrilhos indicam que o sistema metroviário brasileiro gera ganho anual da ordem de R\$ 16 bilhões à sociedade graças à redução do consumo de combustíveis, da emissão de gases poluentes, do tempo de deslocamento e do número de acidentes de trânsito (ANPTRLHOS, 2013).

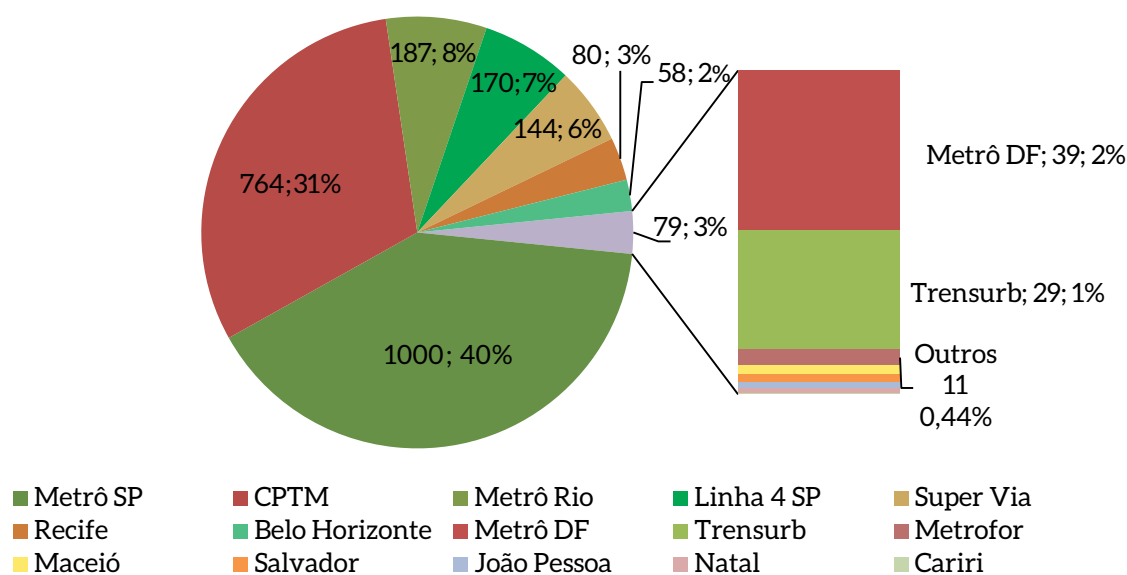


Figura 23 – Número de Passageiros Transportados em 2012 (Milhões)

Fonte: ANPTRILHOS, 2013

Apesar da pequena expansão do transporte sobre trilhos nos últimos anos, os investimentos atualmente propostos podem dobrar a malha metroferroviária para transporte de passageiros até 2018. Aproximadamente, 22 projetos, em diferentes estágios de desenvolvimento, apresentam potencial para expandir a atual malha em até 1.136 km com metrô, veículos leves sobre trilhos (VLT), monotrilhos e trens regionais (ANPTRILHOS, 2013).

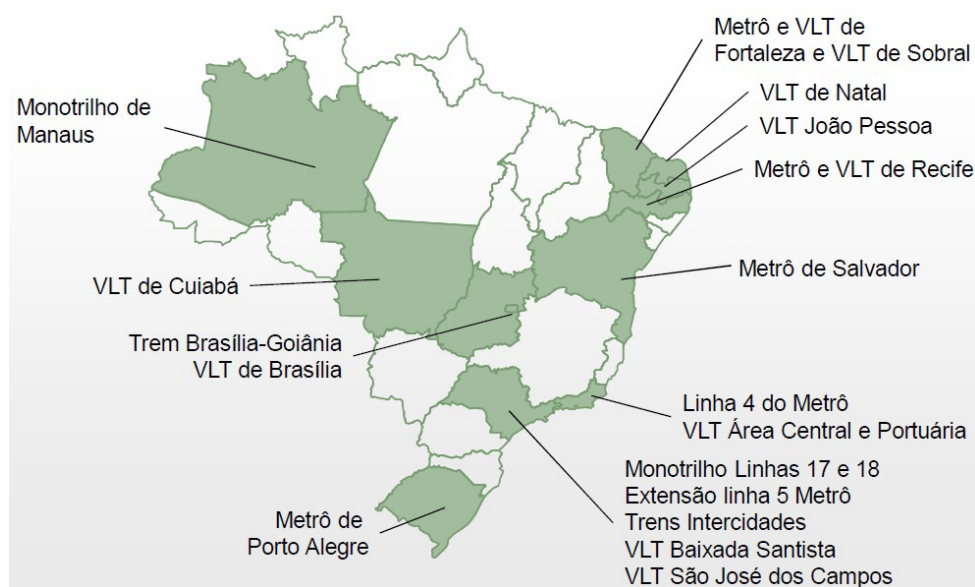


Figura 24 – Potencial de Expansão do Transporte de Passageiros sobre Trilhos

Fonte: ANPTRILHOS, 2013

1.3.2 TRANSPORTE DE CARGA

A principal vantagem do modal ferroviário em relação ao modal rodoviário se refere à capacidade de carregamento do modal. O transporte por trens é preferível para cargas de alta tonelagem. Isso ocorre principalmente para trajetos de longa distância, pois também se leva em consideração o valor do frete: para distâncias e cargas menores, é preferível o transporte rodoviário; para cargas entre 27 e 40 toneladas, há uma competição entre os dois modais, sendo o ferroviário preferível para longas distâncias; para cargas acima de 40 toneladas, é preferível o sistema ferroviário (CNT, 2013c).

O modal ferroviário também se destaca por apresentar menores impactos ambientais em função da menor emissão de poluentes pelas locomotivas e do menor impacto ambiental na construção de infraestrutura necessária ao modal para o transporte de carga (CNT, 2013c). Além de ser mais indicado para o transporte de grandes volumes para médias a longas distâncias, o modal ferroviário apresenta maior segurança em relação ao modal rodoviário, com índice menor de acidentes e menor incidência de furtos e roubos (BRASIL/ANTT, 2014e).

Diante das características geográficas e econômicas do Brasil, que exigem transportes apropriados para longas distâncias e para grande produção de *commodities*, o modal ferroviário tem grande potencial de exploração, constituindo-se em oportunidade para o desempenho econômico nacional (CNT, 2011).

Os produtos predominantes no transporte ferroviário brasileiro são os agrícolas e o minério de ferro. Grande parte dessas cargas é transportada exclusivamente pelas ferrovias até o descarregamento nos portos. Nos casos de movimentação de outros tipos de produtos, boa parte dos clientes adota o uso de mais de uma modalidade (CNT, 2011).

Nos últimos anos, o transporte ferroviário de cargas no Brasil apresentou aumento considerável em suas atividades. De 2006 a 2012, a atividade do transporte ferroviário cresceu cerca de 26%, ou 4,4% ao ano, ao contabilizar o total de TKU transportado, sendo o crescimento no transporte do minério de ferro (que corresponde a 73% do total transportado) o principal fator contribuinte para esse aumento (CNT, 2013c). A participação do modal corresponde a 30% da matriz de transportes de carga no Brasil (BRASIL/SPNT, 2012), sendo que o total de carga transportada em 2013 pelo modal ferroviário foi de cerca de 298,6 milhões de TKU. A quantidade de carga se distribui pelas concessionárias, conforme a Tabela 25.

Tabela 25 – Carga Transportada por Concessionária em 2013

Concessionárias	milhões TKU
ALLMN	20.594
ALLMO	1.484
ALLMP	3.912
ALLMS	15.789
EFC	93.359
FERROESTE	153
EFVM	80.930
FCA	17.789
FNS	2.365
FTC	239
MRS	61.468
TLSA	535
Total	298.616

Fonte: BRASIL/ANTT, 2014d

A Figura 25 representa a evolução da carga transportada ao longo do tempo. Em consonância com esse fato, vem crescendo também a frota ferroviária, de modo a atender esse aumento de demanda, conforme a Figura 26.

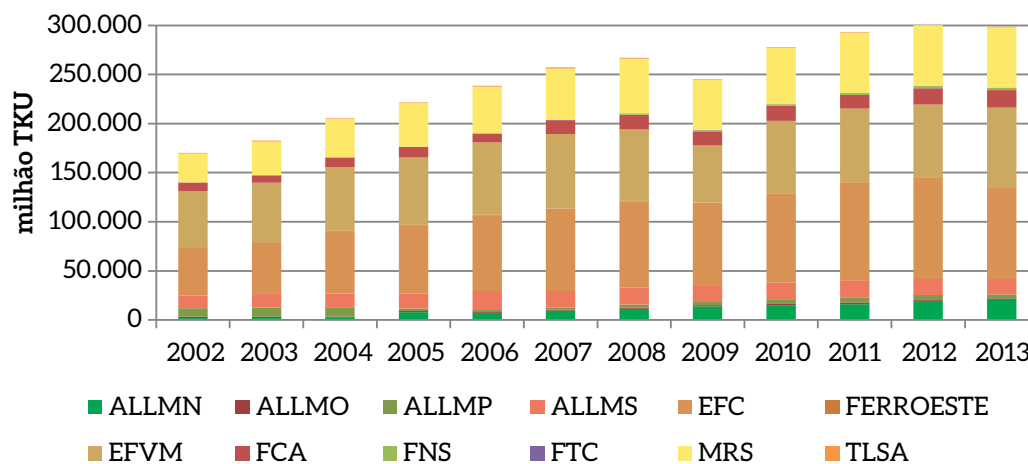


Figura 25 – Carga Transportada por Concessionária

Fonte: BRASIL/MMA, 2012; BRASIL/ANTT, 2014d

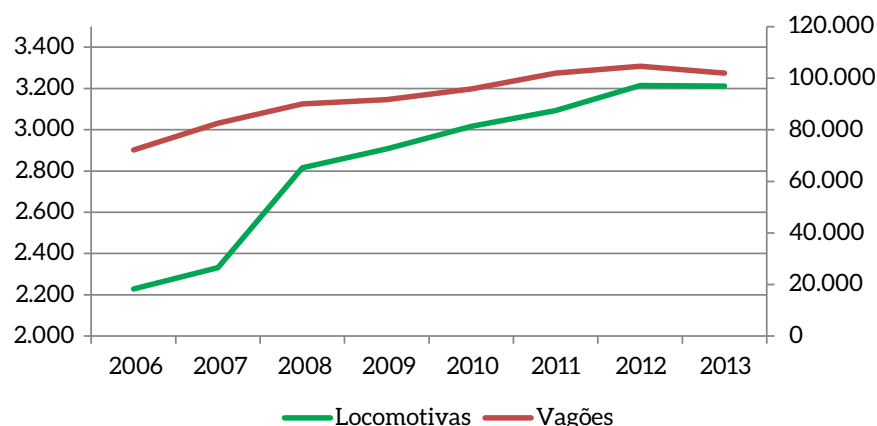


Figura 26 – Quantidade de Locomotivas e Vagões Totais Operando no Modal Ferroviário de Carga

Fonte: BRASIL/ANTT, 2014d

A evolução da frota de material rodante das malhas concedidas cresceu 116,5% no período de 1997 a 2012. Além disso, a idade média dos vagões, que era de 42 anos, foi reduzida para 25 anos até 2010, sendo que a vida útil de um vagão é de 30 a 35 anos (ANTF, 2013).

No momento, ainda não foram disponibilizados dados oficiais referentes ao consumo de óleo diesel por concessionária para anos posteriores a 2011. Para estimar esses valores, são utilizadas as proporções de consumo de cada concessionária em 2011 incididas sobre o valor de uso final do combustível para o modal ferroviário em 2012 – de 1,2 milhão de m³ – disponibilizado pelo Balanço Energético Nacional.

Tabela 26 – Consumo de Óleo Diesel Estimado por Concessionário para 2012

Concessionária	Óleo Diesel (mil m3)
ALLMN	142
ALLMO	18
ALLMP	53
ALLMS	156
EFC	193
FERROESTE	2
EFVM	227
FCA	108
FNS	7
FTC	1
MRS	294
TLSA	10
Total	1.212

Fonte: Elaboração própria a partir de BRASIL/MMA, 2012; BRASIL/EPE, 2014a

Dentre os principais produtos transportados pelo modal ferroviário, encontram-se a soja e o minério de ferro, seguidos pelo milho (3,79%). Dentre os demais produtos individuais, ganha destaque a movimentação de açúcar (2,01%) e carvão/coque (1,29%) (CNT, 2013c).

Tabela 27 – Total de Mercadorias Transportadas pelo Modal Ferroviário em 2012

Subgrupo / Mercadoria	Bilhões de TKU	Part. Média (%)
Minério de ferro	222,9	73,94%
Soja	15,2	5,18%
Milho	15,4	3,79%
Indústria siderúrgica	8,2	2,94%
Farelo de soja	5,6	2,25%
Granéis minerais	5,8	2,14%
Combustíveis, derivados do petróleo e álcool	6,5	2,11%
Açúcar	5,8	2,01%
Adubos e fertilizantes	4,1	1,41%
Carvão/coque	3,6	1,29%
Cimento	1,7	0,66%
Contêiner	1,8	0,60%
Extração vegetal e celulose	1,7	0,58%
Indústria cimenteira e construção civil	1,6	0,54%
Produção agrícola (menos açúcar e milho)	1,4	0,52%
Carga geral – não containerizada	0,1	0,05%
Total	301,4	100,00%

Fonte: CNT, 2013c

1.4 MODAL AÉREO

O transporte aéreo tem sido por décadas – e deverá ser ainda por muito tempo – o meio de integração nacional por excelência em países com dimensões continentais e cenários geográficos extremamente variados. Sua infraestrutura de apoio irradia-se de forma pontual pelo território, uma vez que não tem o caráter linear dos modais terrestres de transporte (ferroviário e rodoviário).

Efetivamente, o modal aéreo pode ser caracterizado como um transporte distinto e especial que necessita de robusta infraestrutura na forma de aeroportos, sistemas de auxílio ao voo e aeronaves, o que requer tecnologias de ponta e maciços investimentos na implementação, modernização e conservação. Assim, quanto maior for o país, maior a influência do setor de transporte aéreo no desenvolvimento econômico nacional devido à grande capacidade de integração proporcionada pelo setor. O Brasil conta atualmente com 63 aeroportos distribuídos entre as 27 unidades da Federação (BRASIL/INFRAERO, 2013). No entanto, ao lado de suas vantagens como meio de transporte rápido, é também o que demonstra de forma mais óbvia suas fragilidades (BRASIL/IPEA, 2010):

- i) Estreitas margens de rentabilidade das operações das empresas aéreas devido às condições de mercado (elevadas barreiras à entrada de novos *players*, centralização do capital, dentre outros);
- ii) Dificuldades dos gestores de infraestrutura aeroportuária e aeronáutica de acompanhar o rápido crescimento das necessidades dos usuários, intermediários e finais, da aviação civil.

Com relação aos aspectos regulatórios desse setor, dois pontos merecem destaque no período 2002-2012: a política de céus abertos e a maior participação do capital estrangeiro em companhias aéreas brasileiras. A entrada em vigor da política de céus abertos é vista pelo setor aéreo como solução de uma restrição “teórica” em termos de aumento de frequência e rotas, pois a decisão de entrada no Brasil ainda depende de uma série de fatores, como as limitações logísticas e de infraestrutura dos principais aeroportos do país. Quanto ao limite para o capital votante em companhias aéreas brasileiras, esse ponto é encarado positivamente pelo mercado como forma de capitalização das empresas, embora sua aprovação ainda esteja em discussão.

Os dois aspectos somados vêm tornando o setor mais atraente aos negócios, favorecendo os investimentos em infraestrutura aeroportuária, como a concessão à iniciativa privada dos aeroportos de Guarulhos (SP), Viracopos (SP), Brasília (DF), Galeão (RJ) e Confins (MG). Os aeroportos leiloados foram arrematados pelo valor total de R\$ 45,3 bilhões, quase quatro vezes o valor mínimo total de R\$ 11,4 bilhões estipulado pelo governo (BRASIL/ANAC, 2014a). O objetivo das concessões foi acelerar a execução das obras necessárias ao atendimento da demanda atual e futura pelo transporte aéreo. Até o final da concessão de cada aeroporto, estão previstos investimentos da ordem de R\$ 4,6 bilhões em Guarulhos, R\$ 8,7 bilhões em Viracopos e R\$ 2,8 bilhões em Brasília, R\$ 5,7 bilhões no Galeão e R\$ 3,5 bilhões em Confins. Além disso, os contratos assinados determinam o estabelecimento de padrões internacionais de qualidade de serviço. Os prazos das concessões são diferenciados por aeroporto: 30 anos para Viracopos e Confins, 25 anos para Brasília e Galeão, 20 anos para Guarulhos (BRASIL/ANAC, 2014b).

Nos últimos anos, a demanda por serviços de transporte aéreo cresceu de forma acelerada, pressionando as infraestruturas existentes, em especial no segmento de passageiros. O consumo de querosene de aviação (QAV) cresceu a uma taxa média de 4,2% a.a., no período 2002-2012 (Figura 27). No caso do modal aéreo, o consumo¹⁹ de energia confunde-se com consumo de derivados de petróleo, afinal, os derivados, especificamente o querosene e a gasolina de aviação, são as únicas fontes de energia utilizadas. No Brasil, o QAV, empregado nos motores com reações a jato e turboélice, é consumido por quase toda a frota aérea circulante no país. Esse combustível participou, em 2010, com cerca de 99% do consumo de energia do subsetor, e a gasolina de aviação (GAV), empregada nos motores a pistão, responde por apenas 1% do total consumido pelo setor aéreo brasileiro (BRASIL/ANP, 2015). Cabe ressaltar que a atual frota²⁰ registrada é de 19.769 aeronaves (BRASIL/ANAC, 2013a) e apresentou um crescimento de 2,9% nos 11 últimos anos.

19 Dos cerca de 7,2 milhões de m³ de QAV comercializados em 2012, 80% supriram o consumo nacional e 20% foram embarcados nos *bunkers* internacionais (BRASIL/ANP, 2015). Esse volume embarcado em *bunkers* é considerado, pelo governo federal, como exportação de energia. Assim, considera-se que o efetivo consumo de QAV, em 2012, foi de 5,8 milhões de m³ (BRASIL/ANP, 2015). O percentual de 20% tem se mantido, praticamente, constante nos últimos dez anos.

20 Em 2012, 519 aeronaves foram utilizadas para voos regulares de passageiros.

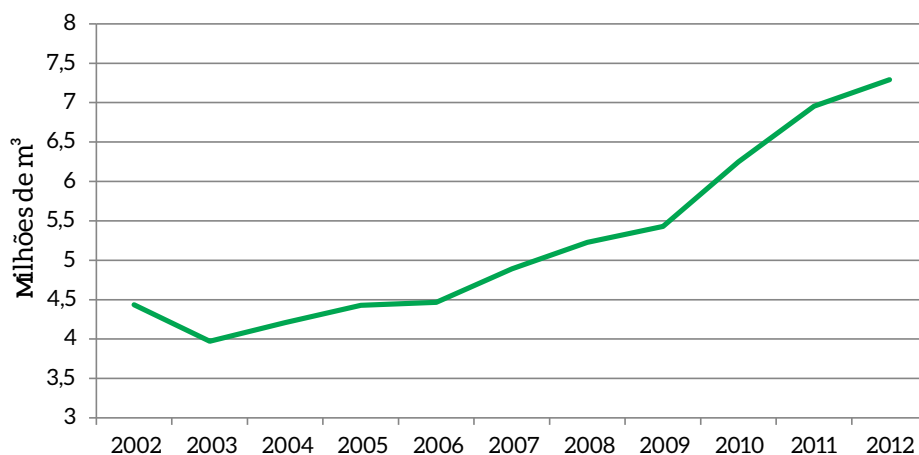


Figura 27 – Evolução do Consumo de Querosene de Aviação

Fonte: BRASIL/ANP, 2015

Os ganhos de eficiência tecnológica no setor de transporte aéreo, cujo efeito é realizado sobre a variação de consumo do combustível, podem ocorrer de diversas maneiras: aeronaves maiores, redução no peso das aeronaves, etapas médias de voo maiores, avanço tecnológico nas turbinas, ou ainda a substituição da frota por aeronaves mais modernas. Todos os fatores anteriormente citados fazem com que as aeronaves voem mais quilômetros com a mesma quantidade de QAV, o que implica diminuição no consumo do combustível por passageiro-quilômetro e tonelada-quilômetro transportados, conforme exibido na Figura 28.

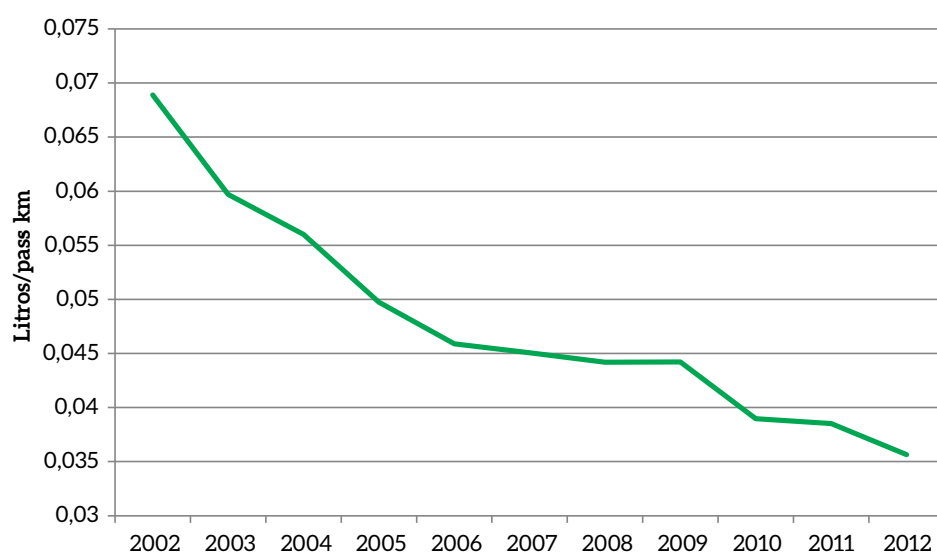


Figura 28 – Ganhos em Eficiência Tecnológica no Transporte Aéreo de Passageiros

Fonte: Elaboração própria a partir de BRASIL/ANAC, 2013a; BRASIL/ANP, 2015

De 2002 a 2012, o volume consumido de QAV em litros/passageiro-km sofreu redução de 6,4% a.a., passando de 0,07 litro/passageiro-km, em 2002, para 0,04 litro/passageiro-km, em 2012. Pode-se pensar que o aumento do número de companhias que exploram nichos regionais (como Azul e Avianca) e, conseqüentemente, o aumento da oferta de voos regionais poderiam ter reduzido a etapa média²¹ de voo e, desse modo, ter reduzido o volume de litros consumido por passageiro. Porém, segundo dados da Agência Nacional de Aviação Civil (BRASIL/ANAC, 2009), verifica-se que, nos últimos anos, a etapa média dos voos domésticos cresceu em comparação à sua base (de 628 km, em 2002, para 792 km, em 2009), justificando, assim, o efeito intensidade propiciado pelos ganhos em eficiência energética.

As oscilações de demanda ocorridas no setor aéreo impactam diretamente o mercado de querosene de aviação, a cadeia de suprimento do derivado em questão (produção, transporte, armazenagem e distribuição) e, conseqüentemente, as emissões de GEE. Nesse caso, devem-se olhar atentamente os principais *drivers* de mercado que ditaram a dinâmica desse segmento e identificar as incertezas críticas que o permeiam. Os principais indicadores para entendimento da evolução do transporte aéreo no Brasil para o segmento de passageiros e carga são: passageiros-quilômetro transportados (RPK), toneladas-quilômetro transportadas. Essas variáveis são tratadas de forma detalhada nas próximas seções.

1.4.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

A demanda por transporte aéreo apresenta diversas particularidades em relação aos outros modais, especialmente no que se refere aos custos operacionais elevados decorrentes da necessidade de uma complexa infraestrutura e da alta tecnologia empregada nas aeronaves (SIMÕES, 2003). Além disso, os usuários do transporte aéreo constituem-se em outro diferencial do setor por apresentarem características especiais, como maior poder aquisitivo (em média), que os distinguem dos usuários dos demais modais de transporte coletivo.

No período 2002-2012, o número de passageiros-quilômetro transportados cresceu a uma taxa média de 12,3% a.a., bem acima da média de crescimento do PIB brasileiro, que foi de 3,6% a.a., no mesmo período, como se pode verificar na Figura 29. Parte desse comportamento pode ser explicado pelos seguintes fatores: crescimento da renda das famílias brasileiras proporcionando acesso aos consumidores das classes C e D, maior acesso a crédito, venda de bilhetes aéreos integrada com venda de passagens rodoviárias (focando em nichos de mercados regionais), criação de novas rotas regionais e maior capilarização da malha, dentre outros. A participação dos segmentos doméstico e internacional, embora tenha oscilado durante o período, permaneceu constante no período 2002-2012 (43% doméstico e 57% internacional).

21 É a divisão entre a distância total percorrida, expressa em quilômetros, pelo número de etapas realizadas. A última estatística divulgada pela Anac referente à etapa média de voo foi no Anuário Estatístico do Transporte Aéreo de 2009.

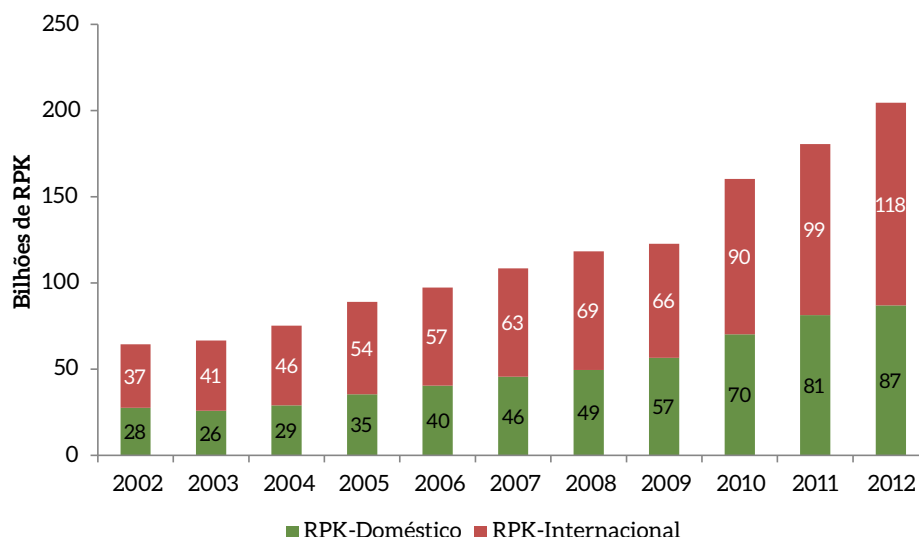


Figura 29 – Passageiros-Quilômetro Transportados (RPK) no Brasil por Segmento

Fonte: Elaboração própria a partir de BRASIL/ANAC, 2013a

Considerando o expressivo desempenho do setor aéreo, pode-se avaliar que o Brasil tornou-se um dos países emergentes com maior potencial de desenvolvimento nesse setor em virtude de uma conjugação favorável de fatores:

- i)** Aumento do poder aquisitivo das famílias;
- ii)** Estabilidade monetária no longo prazo com melhores condições para financiamento das passagens aéreas;
- iii)** Dimensão continental do território;
- iv)** Alta mobilidade geográfica e social da sua população;
- v)** Acelerado deslocamento das fronteiras econômicas;
- vi)** Inserção competitiva nos mercados globais em vasta gama de bens e serviços.

A produtora de aeronaves Boeing corrobora o exposto acima em seu relatório de mercado *Current Market Outlook 2013-2032*, estimando que a América Latina crescerá acima da média mundial a uma taxa de 6,9% a.a. no período em análise.

Outro ponto importante a ser considerado é o preço das passagens aéreas. No período 2002-2012, as tarifas aéreas se comportaram de maneira decrescente, saindo de um patamar médio de R\$ 515, em 2002, para R\$ 294, em 2012, o que significa uma queda de 5,4% a.a. (Figura 30). Ou seja, o passageiro

brasileiro pagou, em 2012, um pouco mais da metade que pagava em 2002. O *yield*²² médio, usado para comparação de preços entre linhas aéreas com diferentes distâncias, também apresentou comportamento similar da tarifa aérea média. Esse processo de redução dos preços dos bilhetes aéreos foi decorrente de um maior número de *players* no setor, o que propiciou maior competição entre as empresas aéreas.

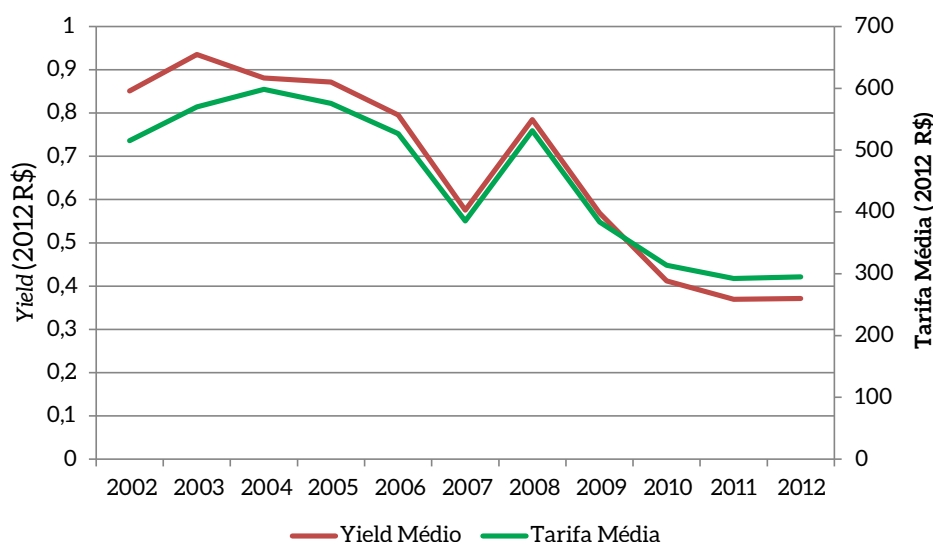


Figura 30 – Evolução da Tarifa Média Doméstica e do Yield Médio Doméstico

Fonte: Elaboração própria a partir de BRASIL/ANAC, 2013b

O ano de 2012 foi considerado desafiador para o setor devido ao comprometimento da rentabilidade das empresas. Um conjunto de fatores contribuiu para esse quadro de inflexão: aumento do preço do combustível, alta do dólar, elevação das taxas e tarifas de navegação aérea, saturação da infraestrutura e ritmo desacelerado da economia global. Esses fatores impactam diretamente os custos de combustível, arrendamento, manutenção e seguro das aeronaves (a soma desses componentes representa aproximadamente 50% dos custos do setor). A resposta das empresas aéreas foi balizada por um processo de enxugamento da oferta, dado que a taxa média de ocupação dos voos estava aquém da recomendada pela indústria, situando-se abaixo de 80%. Como consequência, observou-se que a tarifa média doméstica real de 2012 registrou alta de 0,84% em relação ao ano de 2011.

Entretanto, espera-se que esse efeito seja apenas temporário, sendo que ainda há espaço para a queda das tarifas, dado que o *yield* brasileiro, se comparado ao americano e ao europeu, ainda está além do mínimo cobrado em termos de \$/passageiro-km. Além disso, o setor acredita que a concessão dos aeroportos à iniciativa privada, somada à redução das tarifas aeroportuárias, possa também contribuir para melhor operação das empresas aéreas.

²² Relatório de Tarifas Aéreas da Anac apresenta dois indicadores econômicos de preços de passagens aéreas no Brasil: o *yield* tarifa aérea (que apresenta o valor médio pago por passageiro por trecho) e a tarifa aérea média (que representa o valor médio pago por passageiro em uma viagem aérea). Os indicadores são calculados a partir das informações dos bilhetes de passagem emitidos correspondentes à comercialização dos serviços de transporte aéreo público regular de passageiros no Brasil, mensalmente registradas na Anac pelas empresas aéreas.

O *load factor* é um dos indicadores do setor que permite medir a taxa de ocupação das aeronaves, mostrando o aproveitamento da indústria com relação à ocupação média dos voos ofertados pelas companhias aéreas. Historicamente, a indústria de aviação busca manter uma taxa de ocupação de no mínimo 70% das aeronaves para que o voo ofertado seja financeiramente rentável. No Brasil, a taxa de ocupação dos voos saiu de um patamar de 63% em 2002 para 77% em 2012 (Figura 31). Esse indicador é fortemente afetado pelo número de *players* no mercado. Em momentos de entrada de novos *players*, tende a cair, dado o crescimento na oferta de assentos e, em momentos de concentração de mercado, tende a crescer, dada a retração da oferta de assentos. Outro aspecto importante da taxa de ocupação é o seu impacto no consumo de QAV por passageiro, pois quanto maior for a ocupação de uma aeronave, menor será o número de voos que deverão ser ofertados para atendimento da demanda.

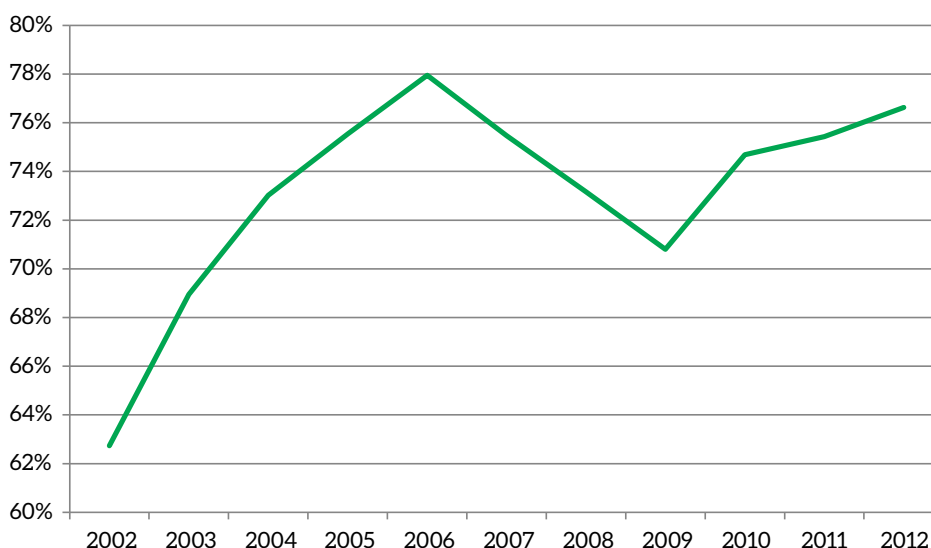


Figura 31 – Evolução da Taxa de Ocupação dos Voos

Fonte: Elaboração própria a partir de BRASIL/ANAC, 2013a

Cabe ainda destacar a comparação entre o crescimento do transporte de passageiros para longas distâncias nos modais aéreo e rodoviário. No período 2003-2012, o transporte rodoviário interestadual de longa distância²³ teve redução de 2% a.a. no número de passageiros transportados, passando de 70,3 milhões, em 2003, para 58,8 milhões, em 2012 (Figura 32). No transporte aéreo, observou-se movimento inverso desse mercado, e acentuado, com 27,3 milhões de passageiros transportados em 2003 e 81,3 milhões em 2012, o que representou um incremento de 200%. Em 2002, os modais rodoviário e aéreo representavam 72% e 28% em termos de passageiros transportados; em 2012, o

23 Quantidade de passageiros que utilizaram o transporte rodoviário interestadual de longa distância, definido pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) como transporte utilizando ônibus rodoviário (sem catraca ou outro dispositivo de controle de tarifação e que permita o transporte de bagagem em compartimento específico) em percursos com distância superior a 75 km, em que a Unidade da Federação de destino é diferente da de origem. Assim, os números de passageiros transportados apresentados a seguir para o transporte aéreo consideram apenas voos interestaduais e de distância maior que 75 km.

cenário foi de mudança significativa, com 42% e 58%, respectivamente. Esse aspecto é explicado pelo maior nível de renda da população brasileira, o que tornou o modal de transporte aéreo mais acessível.

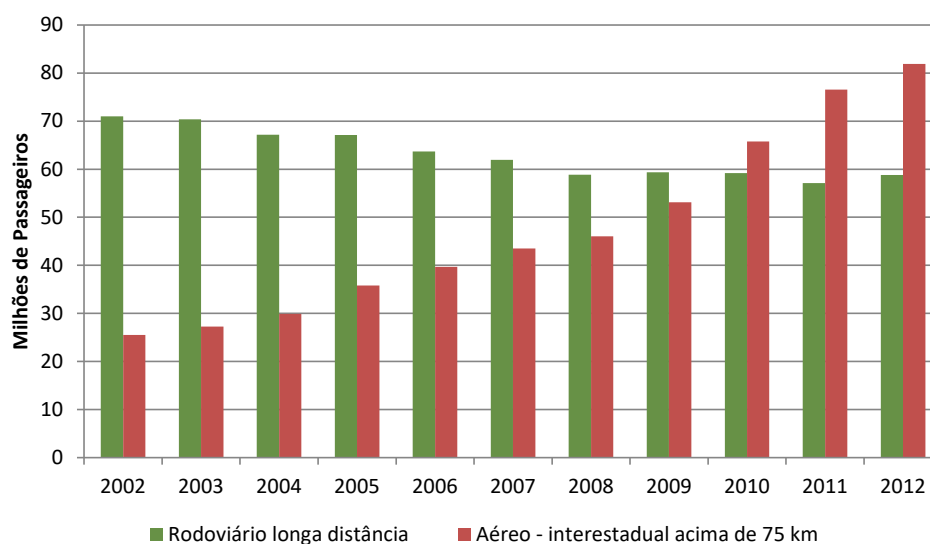


Figura 32 – Passageiros Transportados no Brasil por Modal em Longa Distância

Fonte: Elaboração própria a partir de BRASIL/ANAC, 2013a

1.4.2 TRANSPORTE DE CARGA

Devido a questões socioeconômicas, a grande maioria do movimento de carga aérea no Brasil é realizada pelos porões de aeronaves de voos comerciais de passageiros, fato corroborado pela pequena frota de jatos cargueiros (19 aeronaves cargueiras). No Brasil, o principal aeroporto em termos de movimentação de cargas via aviões cargueiros é Viracopos, em Campinas.

O comportamento da carga transportada pelo serviço aéreo foi aquém do transporte de passageiros, cujo segmento foi fortemente afetado pela crise econômico-financeira de 2008-2009, apresentando recuperação no ano de 2011. No transporte de carga, há a separação da carga transportada pelo transporte aéreo regular (Figura 33) e a transportada em aviões cargueiros pelos terminais logísticos de carga (Figura 34). O volume de cargas regulares cresceu entre 2003-2011 a uma taxa média de 3,0% a.a., e o volume de cargas transportadas pelos terminais de carga cresceu 9,7% a.a. no mesmo período.

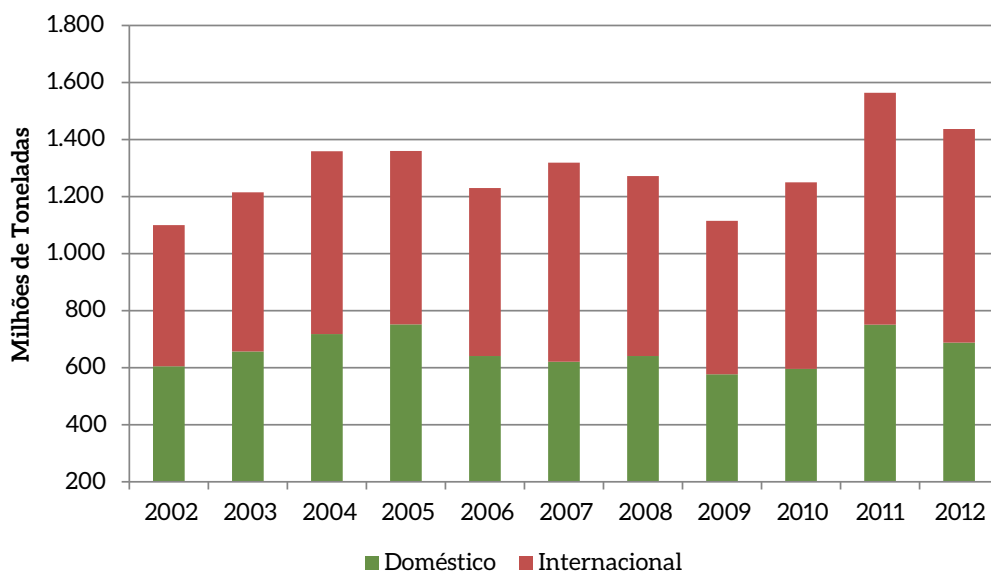


Figura 33 – Carga Aérea Transportada em Voos Regulares

Fonte: Elaboração própria a partir de BRASIL/INFRAERO, 2013

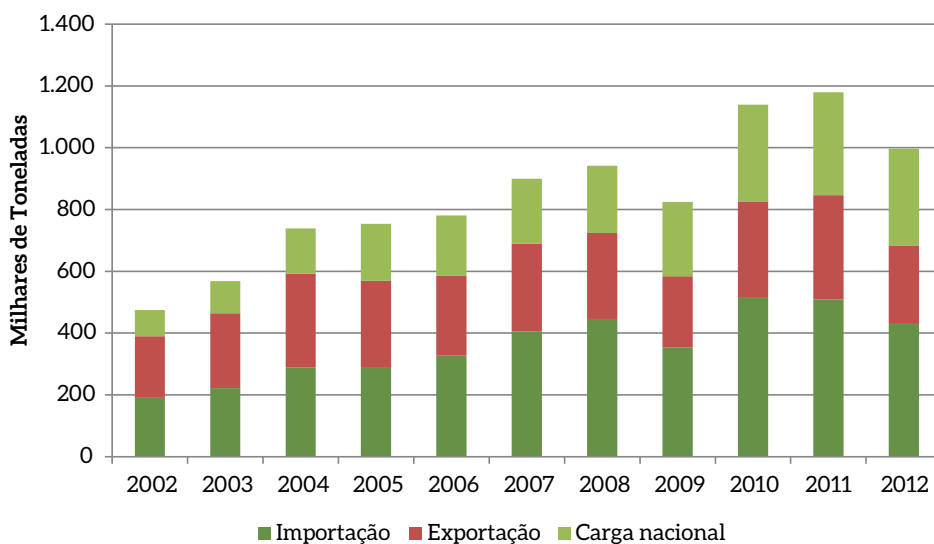


Figura 34 – Carga Aérea Transportada Via Terminais Logísticos

Fonte: Elaboração própria a partir de BRASIL/INFRAERO, 2013

A tonelada-quilômetro transportada nacionalmente cresceu a uma taxa média de 5,8% a.a., grande parte em função do crescimento do transporte de passageiros, pois, como citado anteriormente, a maior parte da carga é transportada no porão das aeronaves que realizam voos regulares. A Figura 35 mostra a evolução desse indicador. Conforme discutido no item 1.1, o volume transportado pelo modal aéreo em termos físicos é irrelevante se comparado aos outros modais de transporte de carga, além da baixa competitividade do modal aéreo quando comparado aos modais rodoviário e marítimo.

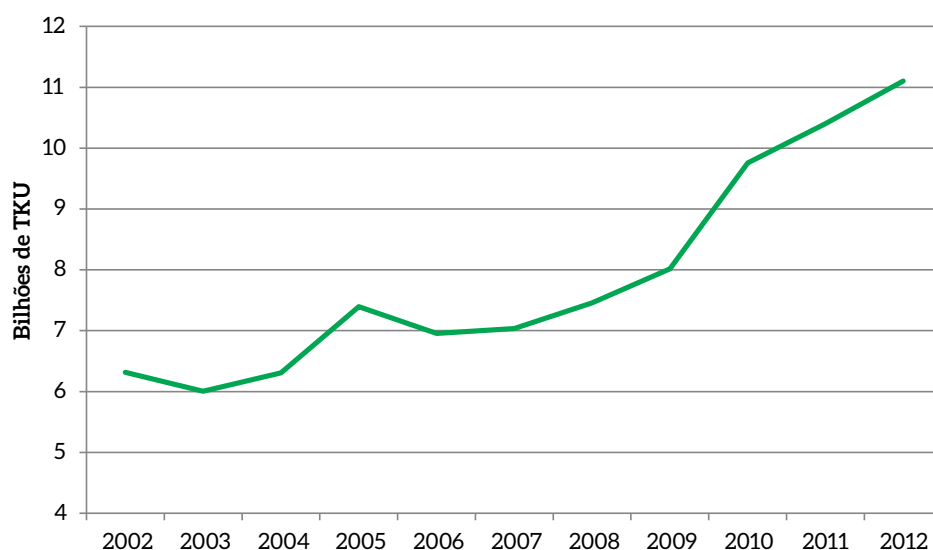


Figura 35 – Evolução do Transporte de Carga

Fonte: BRASIL/EPE, 2012a

Também é interessante destacar que o transporte de carga pelo modal aéreo caracteriza-se por cargas de elevado valor agregado, cujo volume monetário é bastante significativo – 17,60% para importações e 4,45% para exportações. Por outro lado, o volume em termos físicos é irrelevante, se comparado aos outros modais de transporte de carga – 0,22% para importações e 0,19% para exportações (Tabela 28). Esse perfil está diretamente relacionado à pauta de exportações e importações brasileira, que se caracteriza pela exportação de *commodities* – grandes volumes físicos de baixo valor agregado – e pelas importações de bens intensivos em capital. No caso do transporte de carga, a maior parte é conduzida pelos modais aquaviário e rodoviário, tanto no comércio nacional quanto no internacional, como apresentado na Tabela 28, considerando a característica de grande parte da carga transportada no Brasil ser de baixo valor adicionado.

Tabela 28 – Movimentação de Cargas por Modal no Brasil

Modal	Importação		Exportação	
	Volume (10 ³ toneladas)	Valor (milhões US\$ FOB)	Volume (10 ³ toneladas)	Valor (milhões US\$ FOB)
Marítima	126.803	168.310	525.045	202.316
Rodoviária	6.125	10.435	5.122	16.158
Aérea	315	39.266	1.042	10.783
Demais	8.519	5.138	15.056	13.322

Fonte: BRASIL/INFRAERO, 2013

1.5 MODAL HIDROVIÁRIO

Na matriz de transportes brasileira, o transporte hidroviário tem participação inferior a 1% no transporte de passageiros e de 13% no transporte de cargas pelo transporte hidroviário interior e cabotagem (BRASIL/EPE, 2012a; BRASIL/SPNT, 2012). Dessa forma, os números do transporte hidroviário brasileiro podem ser interpretados como pouco expressivos se comparados, por exemplo, com os dos Estados Unidos, onde somente o transporte hidroviário interior representa 30% das movimentações de carga (BRASIL/SPNT, 2012).

Em termos energéticos, em 2012, o transporte hidroviário representou aproximadamente 2% do consumo final energético do setor de transportes nacional (BRASIL/EPE, 2014a), o que demonstra a desproporção perante a sua participação na matriz de transportes. O motivo é a sua maior eficiência energética relacionada ao ganho de escala, seja no transporte de cargas ou de passageiros, o que reflete diretamente nas emissões de GEE por tonelada de carga ou passageiro transportado. Para efeito de comparação desse indicador no nosso país, o transporte hidroviário equivale ao setor industrial têxtil ou à metade do setor industrial de mineração e pelletização.

Os insumos energéticos do transporte hidroviário se resumem aos combustíveis fósseis, que incluem o óleo combustível marítimo (*bunker*) e o diesel marítimo, em conformidade com os requisitos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), que considera, por exemplo, viscosidade, teor de enxofre e ponto de fulgor diferenciados em relação às variações desses dois combustíveis que são aplicados em navegação. O óleo combustível marítimo, adequado para utilização nos motores de combustão interna ciclo diesel, atende os sistemas de propulsão dos navios de grande porte. Já o diesel marítimo, além de ser utilizado nos sistemas de geração de energia elétrica dos navios em geral, tem maior aplicação nos motores de propulsão de embarcações de médio e pequeno porte (BRASIL/PETROBRAS, 2013). No transporte hidroviário brasileiro, predomina a utilização do óleo combustível marítimo, conforme indicado na Figura 36.

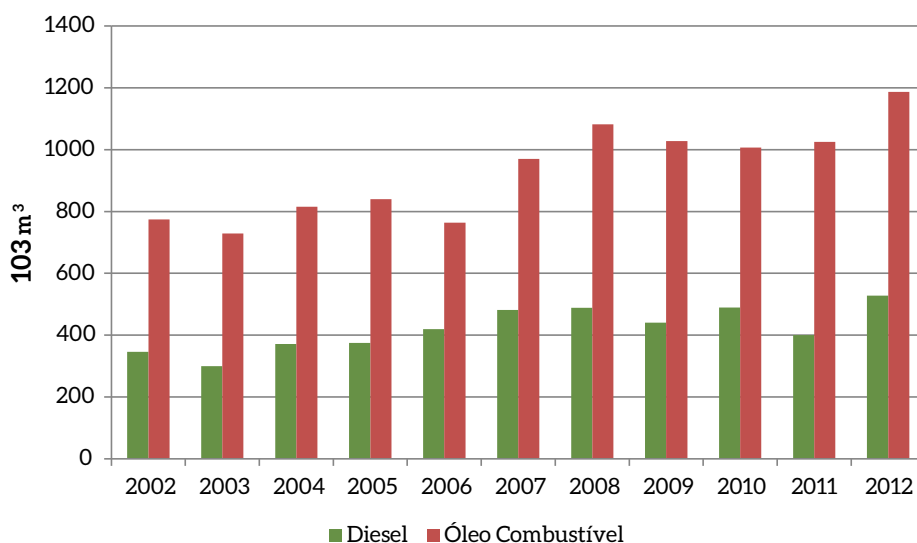


Figura 36 – Consumo de Óleo Diesel e Óleo Combustível no Segmento Hidroviário

Fonte: BRASIL/EPE, 2014a

Em 2012, o óleo combustível marítimo foi comercializado somente em dois estados, Rio de Janeiro e São Paulo, com respectivamente 54% e 46% da realização das compras desse combustível (BRASIL/ANTAQ, 2013a), o que indica um possível uso final no transporte de cabotagem (porto a porto) e navegação de áreas de exploração e produção de petróleo até os portos desses estados. O diesel marítimo, por sua vez, não demonstra a mesma concentração, pois abastece a frota de navegação interior do Brasil, onde prevalecem as embarcações de médio e pequeno porte, o que pode ser observado na Figura 37, tendo o estado do Amazonas como seu maior consumidor.

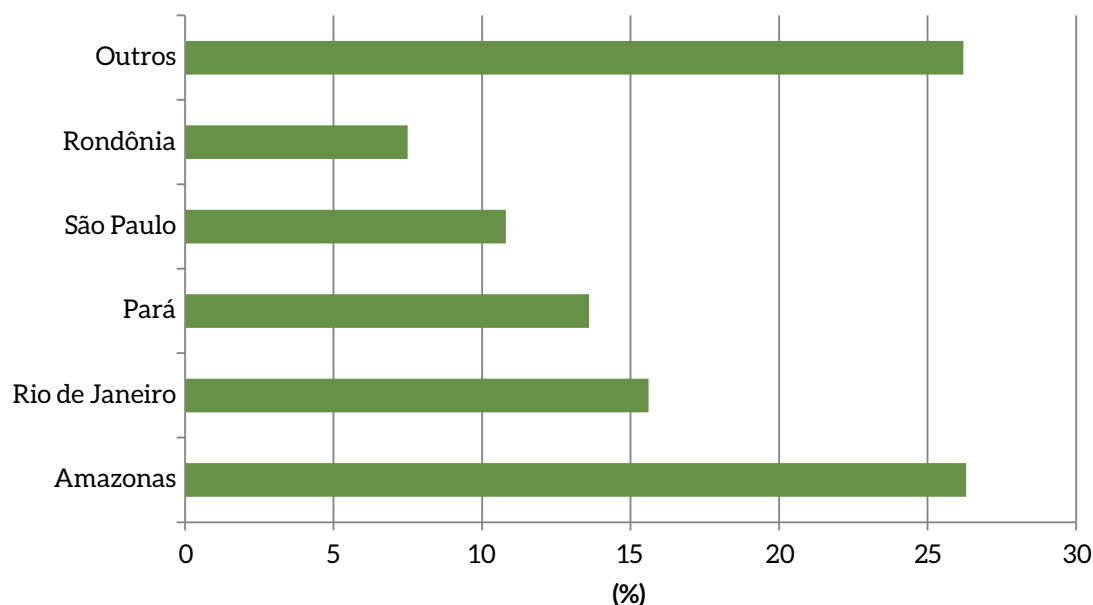


Figura 37 – Principais Estados Compradores de Óleo Diesel Marítimo

Fonte: BRASIL/ANP, 2013

Além dos principais portos utilizados para destino e origem de mercadorias para navegação interior e cabotagem, indicados na Figura 38, destaca-se no Brasil o uso dos terminais de uso privado (TUP), sendo os mais relevantes apresentados no Quadro 1. Em termos de movimentação de carga, os TUP têm papel de grande importância, pois foram responsáveis por 35% das movimentações de carga em 2012, enquanto os portos obtiveram o restante da participação (BRASIL/ANTAQ, 2013a).



Figura 38 – Portos de Navegação de Cabotagem

Fonte: CNT, 2013d

Quadro 1 – Principais Terminais de Uso Privado e suas Localizações

TUP	Localização
TUP CVRD Tubarão	Vitória (ES)
TUP Madre de Deus	Madre de Deus (BA)
TUP Ponta da Madeira	São Luís (MA)
TUP Almirante Barroso	São Sebastião (SP)
TUP Ponta do Ubu	Anchieta (ES)
TUP Porto Trombetas	Oriximiná (PA)
TUP MBR	Mangaratiba (RJ)
TUP Alm. Max. da Fonseca	Angra dos Reis (RJ)
TUP Alm. Tamandaré	Rio de Janeiro (RJ)
TUP Alm. Soares Dutra	Tramandaí (RS)

Fonte: BRASIL/ANTAQ, 2013)

Para todos os tipos de cabotagem brasileira, o que inclui a cabotagem em vias interiores e a cabotagem das bacias de exploração e produção de petróleo aos portos, os dados de frota referentes a 2012 indicam 155 embarcações registradas e capacidade de transporte de 3.024 TPB²⁴ (BRASIL/ANTAQ, 2013b). No entanto, há particularidades para cada tipo (classe) de embarcação quanto à distribuição desses indicadores, conforme pode ser observado na Figura 39. A média de idade dessas embarcações é de 16,5 anos, mas poderia ser menor caso não houvesse grande participação dos petroleiros, que têm média de idade de 21,5 anos (BRASIL/ANTAQ, 2013b, 2014a).

Para o transporte hidroviário interior, embora algumas das embarcações possam ser utilizadas em cabotagem interior (porto a porto), as informações de frota disponíveis de forma desagregada, datadas de 2010, apresentam 1.308 embarcações registradas com capacidade total de transporte de 1.239 TPB e com média de idade de 16 anos (BRASIL/ANTAQ, 2011a).

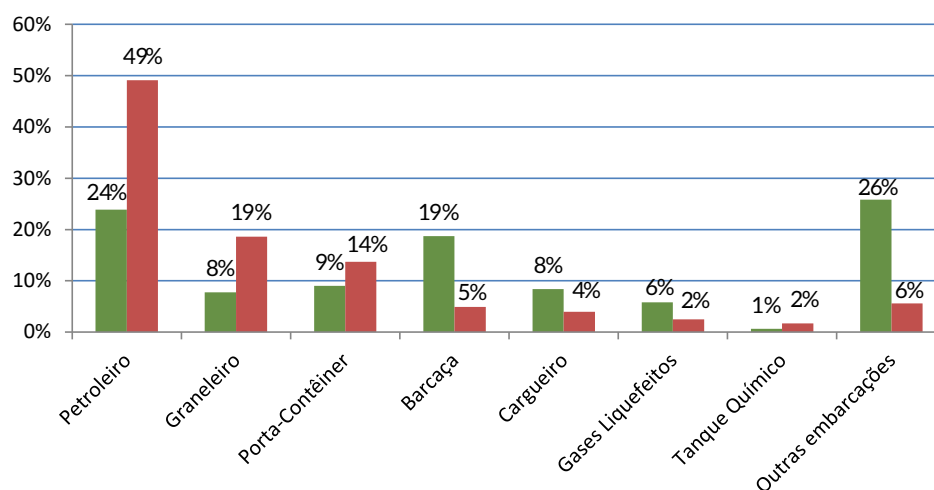


Figura 39 – Quantidade e TPB por Tipo de Embarcações no Transporte de Cabotagem

Fonte: BRASIL/ANTAQ, 2013b

Quanto ao consumo de combustível, o transporte hidroviário interior e a cabotagem apresentam um consumo de diesel da ordem de 4 a 5 litros por 1.000 TKU, cujas considerações também são utilizadas na cabotagem (CNT, 2013a; BRASIL/MT, 2010). No caso da cabotagem, quando utilizado o óleo combustível marítimo, esse consumo em litros seria aproximadamente 12% maior devido a sua menor conversão energética.

De modo geral, o Brasil tem colocado o transporte hidroviário como uma das soluções para ganho de competitividade na redução do frete das mercadorias nacionais comercializadas no Brasil e no exterior. Para alavancar o transporte hidroviário, foram elaborados o Plano Nacional de Logística Portuária (PNLP), pela Secretaria dos Portos, e o Plano Hidroviário Estratégico (PHE), pelo Ministério dos Transportes, respectivamente em 2012 e 2013. Um adequado planejamento, idealizado pelo

24 A tonelagem de porte bruto (TPB) é o peso em toneladas que uma embarcação tem capacidade de transportar, incluídos carga, combustível, aguada, lubrificantes, víveres, sobressalentes, isto é, tudo o que for necessário para a ocorrência da sua completa operação, incluindo tripulação e seus pertences (BRASIL/MT, 2014).

governo federal, poderá tornar exequíveis todas as obras necessárias para a expansão do modal hidroviário. Dessa forma, os novos investimentos teriam de ser executados de acordo com o orçamento previsto pela União, ao contrário do que foi verificado no período de 2002 a 2012, quando os investimentos relativos à navegação em vias interiores utilizaram cerca de 50% dos 4,8 bilhões de reais autorizados ou, no caso da navegação de longo curso e da cabotagem, que foram pagos aproximadamente 56% dos 5,91 bilhões de reais autorizados pelo orçamento fiscal da União no referido período (CNT, 2013d, 2013a).

1.5.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

Devido à falta de dados consolidados para outras regiões e pela relevância no cenário nacional, o transporte hidroviário de passageiros pode ser resumido ao transporte de navegação interior na Região Amazônica e no transporte marítimo na região metropolitana do estado do Rio de Janeiro.

Recentemente, o transporte hidroviário de passageiros na Região Amazônica teve redução de fluxo de 34,6% (4.708.000 passageiros) devido ao deslocamento do transporte fluvial relativo às travessias Manaus-Cacau Pereira e Manaus-Iranduba para o transporte rodoviário, possibilitado pela construção da ponte do Rio Negro em 2011 (BRASIL/ANTAQ, 2013c).

Por meio de uma pesquisa intitulada “Caracterização da Oferta e da Demanda do Transporte Fluvial de Passageiros na Região Amazônica”, encomendada pela Agência Nacional de Transportes Aquaviários (Antaq), cuja área de abrangência é apresentada na Figura 40, conseguiu-se pela primeira vez identificar consistentemente a quantidade e o perfil do transporte de passageiros na Região Amazônica.

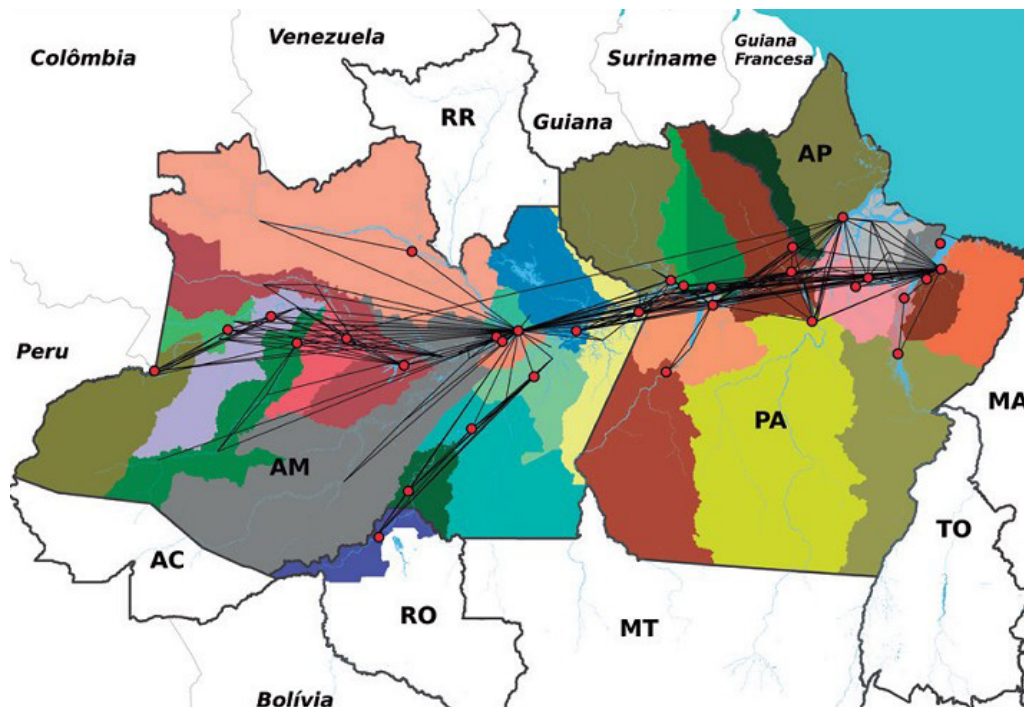


Figura 40 – Abrangência do Estudo do Transporte Hidroviário na Amazônia

Fonte: BRASIL/ANTAQ, 2013c

Essa pesquisa concluiu que, em 2011 e 2012, foi transportada uma média anual de 8,894 milhões de passageiros em 602 embarcações legalizadas, em 313 linhas de trajetos estaduais e interestaduais.

Em virtude da grande quantidade de linhas de transporte hidroviário na Amazônia e das diferentes necessidades de movimentação dos habitantes da região, ocorrem extremos tanto em trajetos quanto na quantidade de passageiros. Os três quilômetros que separam as cidades paraenses de Almerim e Óbidos e os 2.417 km em hidrovia para se chegar de Eurinepé a Manaus, no estado do Amazonas, são evidências dessa característica particular do transporte fluvial amazônico. A respeito da quantidade de passageiros, existem linhas que transportam anualmente menos de centenas de passageiros enquanto outras têm grande participação no transporte de passageiros na região, conforme indicado na Figura 41, que contempla as cinco linhas que transportam mais passageiros, cerca de 17% do total de pessoas transportadas na Região Amazônica (BRASIL/ANTAQ, 2013c).

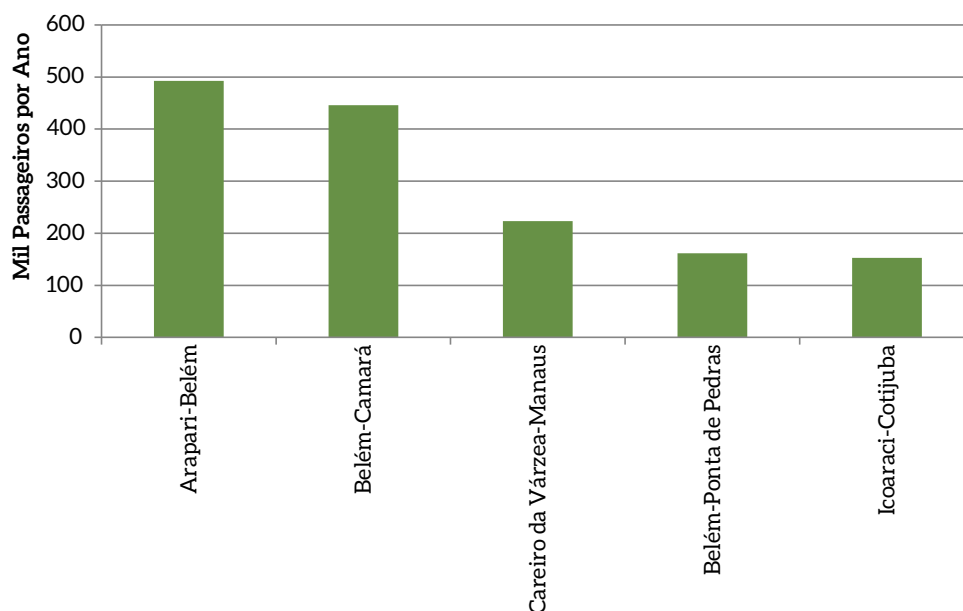


Figura 41 – Cinco Maiores Linhas de Movimentação de Passageiros na Amazônia

Fonte: BRASIL/ANTAQ, 2013c

A Região Amazônica tem o transporte hidroviário como o mais importante meio de transporte dos seus habitantes em virtude, muitas vezes, da ausência da concorrência de outro modal, como o rodoviário. Por isso, a navegação fluvial é um importante vetor econômico da região Norte, onde cerca de 74% da população têm renda de até três salários mínimos (BRASIL/ANTAQ, 2013c). Tal fato leva a uma infraestrutura portuária e de terminais precária, embarcações com tempo avançado de utilização, o que ocasiona baixa qualidade do transporte hidroviário nos aspectos de conforto, segurança e tempo de deslocamento (BRASIL/ANTAQ, 2013c).

Devido às diferenças de distância, demanda de passageiros e porte de embarcações, as tarifas do transporte hidroviário de passageiros na Amazônia poderiam ser representadas em reais por quilômetro percorrido. Utilizando essa metodologia, encontra-se uma tarifa média de R\$ 0,59/km (BRASIL/ANTAQ, 2013c).

A outra grande concentração de transporte hidroviário de passageiros no Brasil se refere ao transporte urbano marítimo de passageiros na região metropolitana do Rio de Janeiro, que inclui diretamente os municípios do Rio de Janeiro e Niterói, com grande influência de passageiros provenientes de municípios próximos a Niterói, como São Gonçalo, Itaboraí e Maricá. O município do Rio de Janeiro dispõe de terminais de passageiros localizados na Praça 15, Cocotá e Paquetá, enquanto a cidade de Niterói tem dois pontos de origem e destino, a Praça Arariboia e Charitas.

Ao contrário do transporte hidroviário de passageiros na Região Amazônica, esse tipo de transporte na região metropolitana do Rio de Janeiro tem grande concentração de passageiros e ocorre somente em quatro linhas. Em 2012, 85,5% da movimentação de passageiros ocorreram em uma das linhas, entre os terminais da Praça Arariboia e Praça 15. Somadas as outras três linhas, totalizaram-se 28,689 milhões de passageiros no referido ano (RJ/IPP, 2014). Outra diferença oriunda da existência de poucas linhas, em lugar das 313 da Região Amazônica, por exemplo, é a facilidade de monitoramento da quantidade de passageiros, conforme pode ser observado na Figura 42, relativa ao histórico entre 2002 e 2012.

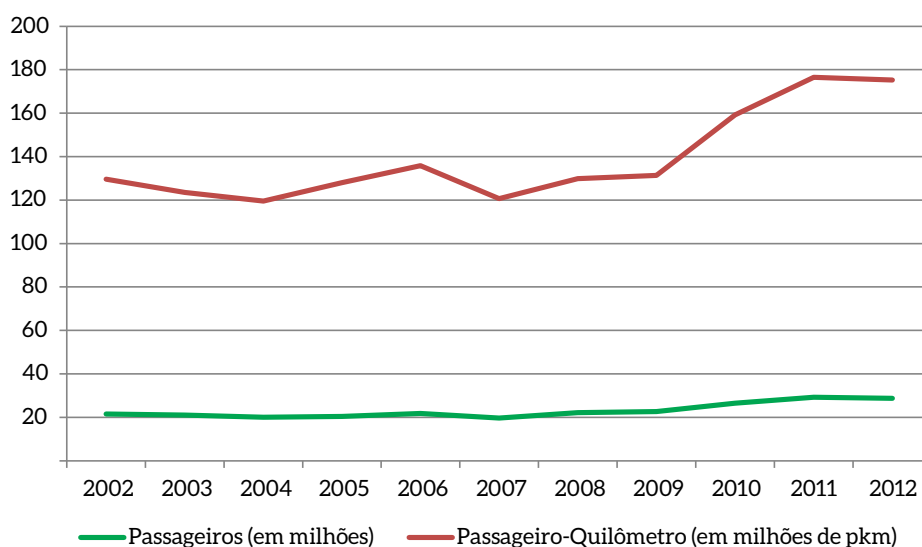


Figura 42 – Movimentação de Passageiros por Hidrovias na Região Metropolitana do RJ

Fonte: RJ/IPP, 2014

A respeito das distâncias, a linha de maior quantidade de passageiros (Praça 15-Praça Arariboia) tem 5,0 km, enquanto Praça 15-Paquetá, Praça 15-Cocotá e Praça 15-Charitas têm 19,2 km, 13,7 km e 9 km, respectivamente. Como em qualquer tipo de transporte de passageiros, há características da composição de tarifação referentes a conforto, tempo de espera no terminal, tempo de viagem, serviços oferecidos, entre outros itens, mas não abordadas neste estudo. Por isso, sem considerar tais pontos e da mesma forma que foi analisada a tarifa média do transporte hidroviário na Região Amazônica, chega-se a um valor de tarifa média do transporte hidroviário de passageiros na região metropolitana do Rio de Janeiro de R\$ 0,75/km (Tabela 29). Outro aspecto diferenciado desse tipo de transporte no Rio de Janeiro se refere à idade média das embarcações, que é de 47 anos, enquanto a da frota de transporte de passageiros dos estados do Amapá, Amazonas e Pará é de 11 anos (BRASIL/ ANTAQ, 2013c).

Tabela 29 – Tarifas do Transporte Hidroviário no Rio de Janeiro

Linha	Tarifa (R\$)	Tarifa (R\$/km)
Praça 15 – Praça Arariboia	4,80	0,96
Praça 15 – Cocotá	4,80	0,35
Praça 15 – Paquetá	4,80	0,25
Praça 15 – Charitas	13,00	1,44

Fonte: BARCAS, 2014

Com os números de passageiros e as distâncias das linhas do transporte hidroviário da Região Amazônica e da região metropolitana do Rio de Janeiro, torna-se possível identificar a relevância de cada um para composição dos indicadores de transporte hidroviário de passageiros nacional, conforme apresentações na Figura 43 e na Figura 44. Assim, em termos gerais, em 2012, estima-se que o transporte hidroviário de passageiros no Brasil obteve um fluxo de 37,683 milhões de passageiros e uma atividade de 1,892 bilhão de passageiros-km (pkm).

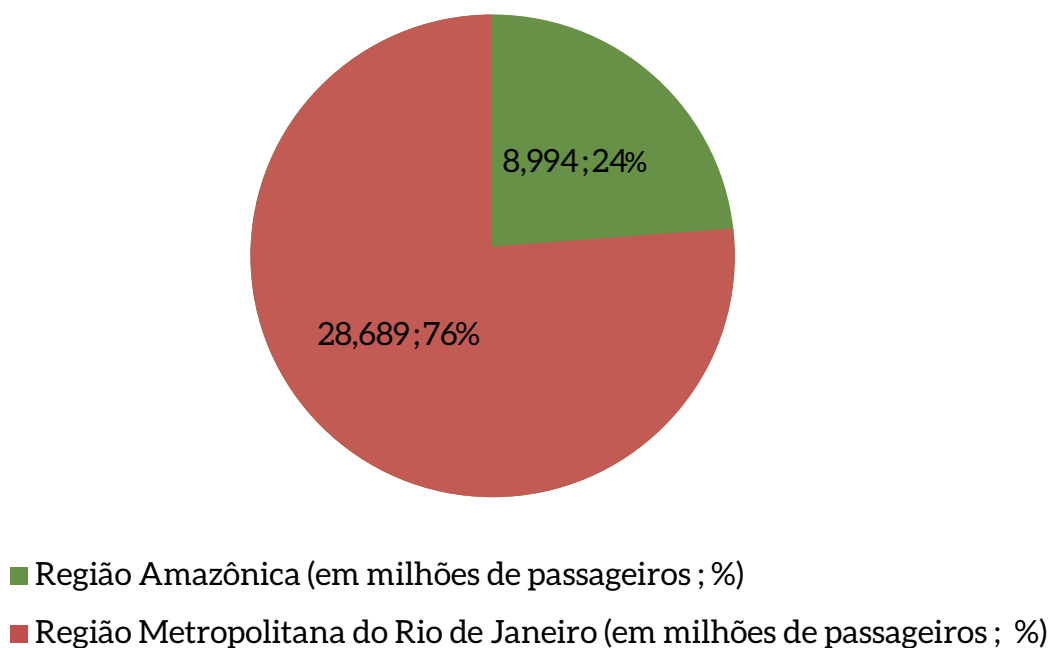
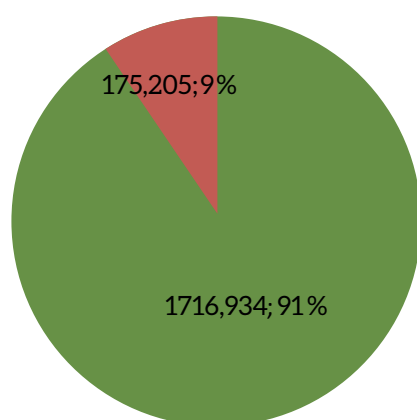


Figura 43 – Quantidade de Passageiros do Transporte Hidroviário Brasileiro em 2012

Fonte: BRASIL/ANTAQ, 2013c; RJ/IPP, 2014



- Passageiro-Quilômetro da Região Amazônica (em milhões de pkm ; %)
- Passageiro-Quilômetro da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (em milhões de pkm ; %)

Figura 44 – Passageiros-Quilômetro do Transporte Hidroviário Brasileiro em 2012

Fonte: BRASIL/ANTAQ, 2013c; RJ/IPP, 2014

1.5.2 TRANSPORTE DE CARGA

O transporte hidroviário interior é dividido em três categorias: navegação interior, cabotagem e navegação interior de longo curso, conforme exemplos no Quadro 2. A navegação interior pode ser do tipo estadual, interestadual ou internacional. No caso da navegação interior internacional e navegação interior de longo curso, a tonelada-quilômetro transportada é contabilizada pela Antaq de acordo com coordenadas da linha de base reta da costa brasileira (Decreto nº 4.983/2004) como limite das vias interiores.

Quadro 2 – Exemplos de Transporte Hidroviário em Território Nacional

Tipo de Transporte Hidroviário	Exemplo de Rota
Cabotagem em vias interiores	Santos (SP) – Santarém (PA)
Navegação interior de longo curso	Corumbá (MS) – San Nicolas (Argentina)
Navegação interior estadual	Belém (PA) – Moju (PA)
Navegação interior interestadual	Manaus (AM) – Porto Velho (RO)
Navegação interior internacional	Macapá (AP) – Xangai (China)

Fonte: Elaboração própria

A Antaq tem divulgado a carga total útil transportada e a tonelada-quilômetro útil (TKU) em vias interiores desde 2010, o que pode ser observado na Figura 45. Desses dados, conclui-se que, em 2011, houve aumentos de 7,1% e 5,2% em toneladas e TKU, respectivamente, enquanto, em 2012, os aumentos foram somente de 1,5% e 1,1% desses indicadores.

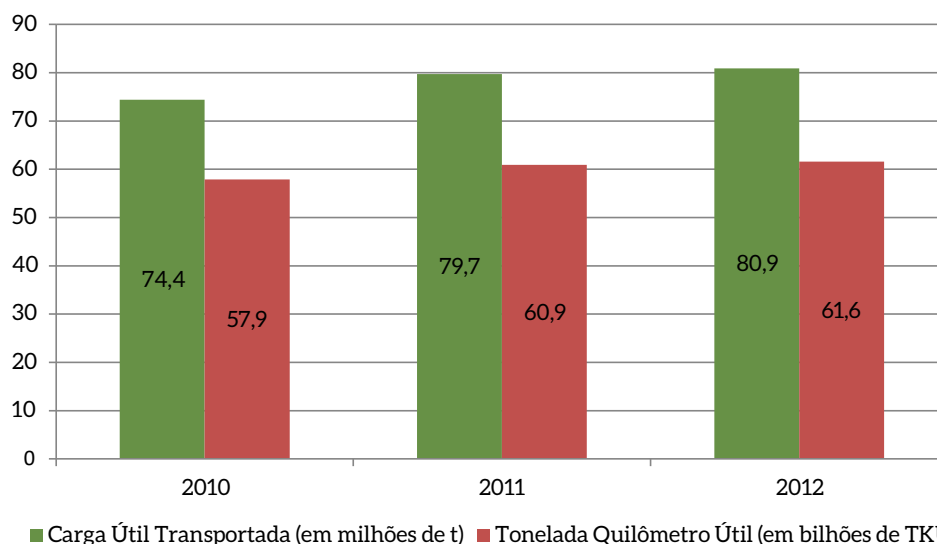


Figura 45 – Carga Útil Transportada e Tonelada-Quilômetro útil em Hidrovias Interiores no Brasil

Fonte: Elaborado a partir BRASIL/ANTAQ, 2011b, 2012a, 2013a, 2013d

Quanto a 2012, a Figura 46 indica a distribuição entre navegação interior, cabotagem em vias interiores e navegação interior de longo curso. A cabotagem em vias interiores, apesar de ter obtido a menor participação em toneladas transportadas em 2012, supera a navegação em vias interiores e navegação em vias interiores de longo curso no indicador de TKU.

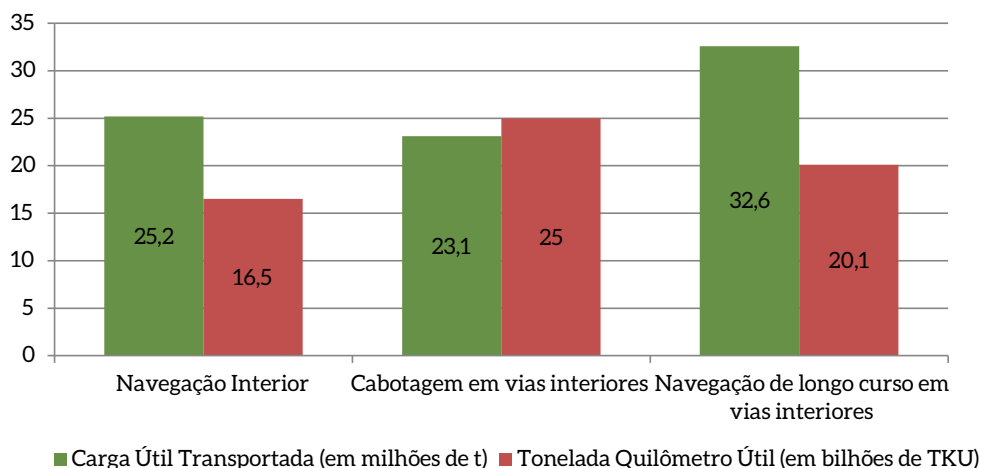


Figura 46 – Distribuição do Transporte Hidroviário Interior em 2012 em Toneladas e TKU

Fonte: BRASIL/ANTAQ, 2011b, 2013d

Tanto em carga útil transportada quanto em tonelada-quilômetro útil, as cargas transportadas nas hidrovias interiores têm a concentração de alguns grupos de mercadorias, como bauxita, combustíveis, óleos minerais, minério de ferro e soja. De todos esses, a bauxita é o produto com maior quantidade de tonelada-quilômetro útil transportada nas hidrovias interiores, com 35,9%, onde a cabotagem em vias interiores respondeu por 68,7% dessas movimentações.

No que se refere à distribuição geográfica do transporte em hidrovias interiores, existe uma participação muita expressiva da hidrovia Solimões-Amazonas tanto em toneladas de carga útil quanto em TKU. Das sete hidrovias destinadas ao transporte de carga, de acordo com dados de 2012 disponibilizados pela Antaq, apenas a hidrovia do São Francisco teve participação irrelevante (0,1%). Em tonelada-quilômetro útil, a hidrovia Solimões-Amazonas teve 76% do *share* e, em carga útil transportada, teve 55% de participação. A explicação dessa diferença é uma maior proximidade da hidrovia Tocantins-Araguaia com os portos destinados a cabotagem e exportação das *commodities* na região Norte do Brasil, que transformou a participação de 24% em carga útil transportada em apenas 6% em tonelada-quilômetro útil. Além dessas duas hidrovias, destacaram-se a hidrovia do Madeira, com 9% de participação em TKU, hidrovia do Paraguai, com 4%, hidrovia Paraná-Tietê, com 3%, e hidrovia do Sul, com 2% (BRASIL/ANTAQ, 2013d).

No entanto, as cargas transportadas pela cabotagem brasileira excedem as movimentações nas vias interiores, pois, em 2012, houve 138.645 milhões de toneladas transportadas e 147.453 bilhões de TKU (BRASIL/ANTAQ, 2013d), cuja distribuição é apresentada na Figura 47. Essa grande diferença é explicada pelas cargas do tipo granel líquido (petróleo e seus derivados, principalmente), que respondem por mais de 86% de todo o montante da cabotagem em carga útil transportada, cuja maioria da carga transportada não está contabilizada na cabotagem em vias interiores devido à linha de base da costa brasileira mencionada. Cabe destacar que a bauxita é considerada cabotagem em vias interiores devido ao uso de portos e terminais fora da costa marítima.

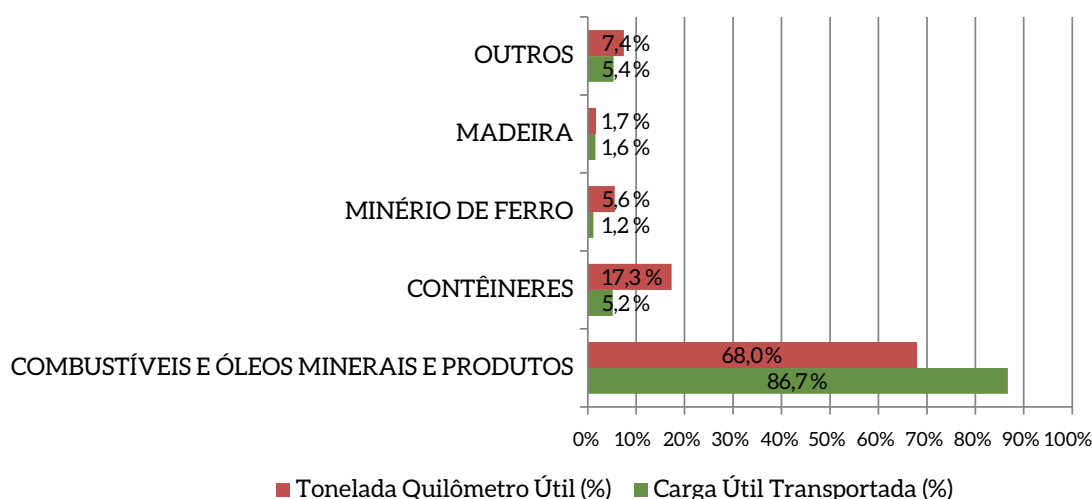


Figura 47 – Participação dos Principais Grupos de Mercadorias em Tonelada-Quilômetro Útil e Carga Útil Transportada em 2012 no Transporte de Cabotagem

Fonte: BRASIL/ANTAQ, 2012b, 2013b

Por isso, uma análise mais abrangente do transporte hidroviário de cargas exigiria incluir o total transportado pela cabotagem, o que leva à contabilização das movimentações entre plataformas de petróleo e portos e os trechos não contemplados pela cabotagem em vias interiores, que são os trajetos entre portos e terminais somente marítimos. No caso da cabotagem da bauxita e dos contêineres transportados entre Manaus e Santos, a Antaq já contempla essa contabilização na cabotagem de vias interiores. Com isso, a carga útil transportada e a tonelada-quilômetro útil em todas as vias interiores, apresentadas na Figura 45, seriam somadas a esses indicadores de cabotagem total e subtraídas da cabotagem em vias interiores, gerando os resultados indicados na Figura 48, que representa com maior fidelidade as cargas transportadas no transporte hidroviário em 2011 e 2012.

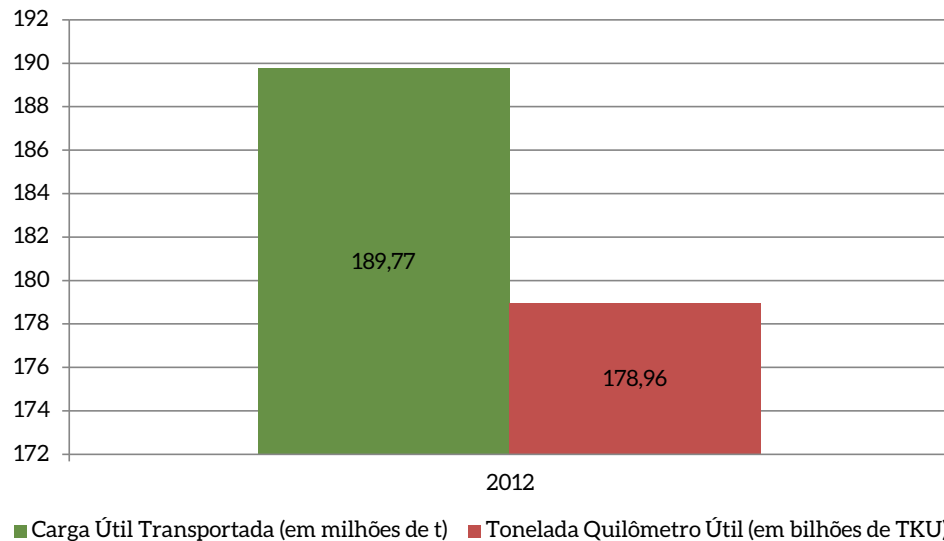


Figura 48 – Carga Útil Transportada e Tonelada-Quilômetro Útil em Todas as Hidrovias do Brasil

Fonte: Elaborado a partir de BRASIL/ANTAQ, 2012a, 2012b, 2013a, 2013b, 2013d

Em termos de tonelada-quilômetro útil transportada, em 2012, o setor hidroviário brasileiro apresentou uma distribuição dos grupos de mercadoria transportada de acordo com o demonstrado na Figura 49.

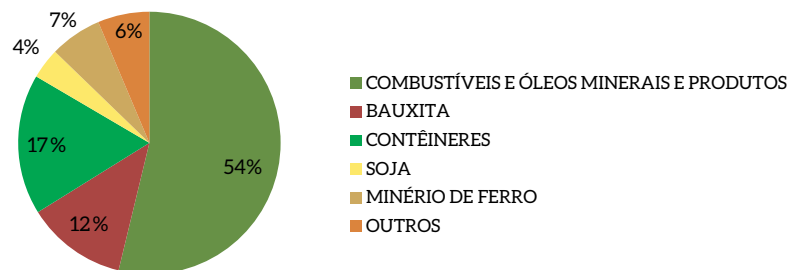
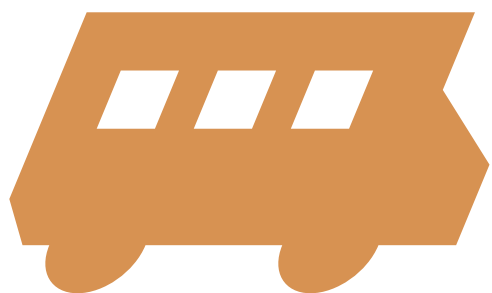


Figura 49 – Distribuição das Principais Cargas Transportadas nas Hidrovias (TKU)

Fonte: Elaborado a partir de BRASIL/ANTAQ, 2012b, 2013b, 2013d



Emissões de gases de efeito estufa do setor de transportes

Capítulo

2

2 EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DO SETOR DE TRANSPORTES

Este capítulo objetiva avaliar as emissões de GEE, que incluem dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), para o setor de transportes, para o período de 2002 a 2012. O desenvolvimento desta seção torna-se importante para a elaboração *a posteriori* das projeções das emissões no horizonte de 2012 a 2050. Deve-se destacar que a avaliação de oportunidades de mitigação de emissões de GEE exige a desagregação das emissões ao nível de modais de transportes e por categorias de veículos. Por esse motivo, utilizam-se as informações constantes da *Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima* (TCN) (BRASIL/MCTIC, 2016) apenas para a calibração das emissões do ano-base considerado para as projeções, qual seja, de 2010.

Neste estudo, as emissões de CO₂ são calculadas pela metodologia *top-down*, utilizando-se os dados de combustível consumido no setor fornecido pela EPE (2014a). As emissões de CH₄ e N₂O, por sua vez, devido à limitação de informações no setor, seguem a metodologia apresentada pela TCN (BRASIL/MCTIC, 2016), levando-se em consideração as informações detalhadas do setor nos itens anteriores.

Para a construção do inventário de emissões de CO₂, aplica-se a metodologia em seis passos: i) cálculo do consumo de energia; ii) cálculo da quantidade de carbono; iii) cálculo da quantidade de carbono fixado; iv) cálculo das emissões líquidas de carbono; v) cálculo das emissões reais de carbono; e vi) cálculo das emissões reais de CO₂.

$$ER_i^{CO_2} = \left[(CA_i \cdot FC_i \cdot 41,87 \cdot 10^{-3} \cdot FE_i) - QCF_i \right] \cdot 0,99 \cdot 44/12 \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde, $ER_i^{CO_2}$ é a quantidade de emissões reais de dióxido de carbono do combustível *i* em GgCO₂; CA é o consumo aparente do combustível *i* em ktEP; FC é o fator de conversão do combustível *i* de ktEP para TJ; 41,87 x 10⁻³ TJ representa 1 tEP brasileiro (BRASIL/EPE, 2014a); FE é o fator de emissão de carbono do combustível *i* em tC/TJ; QCF_{*i*} é a quantidade de carbono fixado do combustível *i* em GgC; 0,99 representa a parcela de carbono oxidada (IPCC, 2006) e 44/12 é o conteúdo de carbono: em cada 44t de CO₂ há 12t de carbono.

Como fator de conversão, utiliza-se 0,770 tEP/m³ para a gasolina, 0,00088 tEP/m³ para o GNV, 0,848 tEP/m³ para o diesel, 0,822 tEP/m³ para o querosene de aviação e 0,959 para o óleo combustível, de acordo com a EPE (2014a). No caso dos fatores de emissão, utilizam-se 18,90 tC/TJ para a gasolina, 19,50 tC/TJ para o querosene de aviação, 21,1 tC/TJ para o óleo combustível, 15,30 tC/TJ para o GNV e 20,20 tC/TJ para o diesel, de acordo com o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2006).

As emissões reais de CO₂ do setor de transportes no Brasil são apresentadas na Tabela 30. Em 2012, foram liberados para a atmosfera 200 milhões de toneladas de dióxido de carbono pelo setor de transportes, o que representou um crescimento médio anual de 4,6% desde 2002.

Tabela 30 – Emissões Totais de CO₂ por Combustível

(GgCO ₂)	Gasolina	Diesel	QAV	Óleo Comb	GNV	Total
2002	35.835	80.009	9.167	2.380	2.005	129.397
2003	37.810	77.335	6.502	2.242	2.718	126.607
2004	39.088	82.992	6.951	2.507	3.233	134.771
2005	39.177	82.727	7.568	2.584	3.979	136.035
2006	41.636	84.161	7.058	2.350	4.720	139.925
2007	41.200	88.379	7.760	2.984	5.237	145.559
2008	41.898	93.158	8.331	3.328	5.019	151.734
2009	42.287	91.134	8.381	3.161	4.310	149.272
2010	50.495	99.674	9.448	3.097	4.108	166.822
2011	60.014	104.845	10.577	3.160	4.035	182.632
2012	70.414	111.275	11.149	3.657	3.974	200.468

Fonte: Elaboração própria a partir de BRASIL/EPE, 2014a

O modal rodoviário foi responsável por mais de 90% das emissões do setor de transportes em 2012, como se pode verificar na Tabela 31. No período de 2002 a 2012, o crescimento anual médio das emissões dos modais rodoviário e hidroviário foi de 4,8%, enquanto o modal ferroviário experimentou um crescimento médio de 3,6% a.a. O modal aéreo teve aumento das emissões de 2,8% a.a. em média.

Tabela 31 – Emissões Totais de CO₂ por Modal

(GgCO ₂)	Rodoviário	Ferrovário	Hidroviário	Aéreo	Total
2002	114.701	2.125	3.281	9.289	129.397
2003	114.848	2.097	3.023	6.639	126.607
2004	121.822	2.390	3.472	7.085	134.771
2005	122.252	2.530	3.561	7.691	136.035
2006	126.468	2.803	3.440	7.214	139.925
2007	130.416	2.986	4.237	7.921	145.559
2008	135.611	3.057	4.600	8.466	151.734
2009	133.485	2.965	4.306	8.516	149.272
2010	149.906	2.945	4.369	9.602	166.822
2011	164.775	2.922	4.202	10.733	182.632
2012	181.121	2.997	5.033	11.317	200.468

Fonte: Elaboração própria a partir de BRASIL/EPE, 2014a

Em 2012, a participação dos ônibus no transporte rodoviário brasileiro de passageiros representava mais de 45% dos deslocamentos motorizados nas cidades com mais de 60 mil habitantes. No entanto, os ônibus corresponderam a apenas 11% das emissões de CO₂ do modal rodoviário. Por outro lado, os veículos leves e motocicletas contribuíram com 41% das emissões de CO₂, conforme apresentado na Figura 50. Esse quadro evidencia a importância de políticas ambientais voltadas à substituição do transporte individual pelo transporte coletivo.

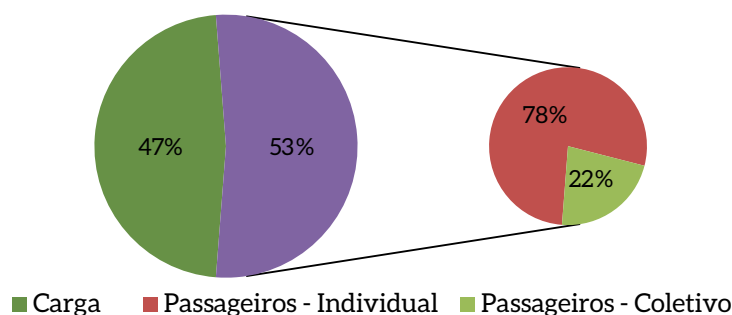


Figura 50 – Distribuição das Emissões de CO₂ do Modal Rodoviário – 2012

Fonte: Elaborado a partir de BRASIL/EPE, 2014a

Cumpra-se destacar que essas estimativas desconsideram as emissões oriundas da biomassa. Ou seja, assume-se que todo o carbono emitido é reabsorvido durante a fotossíntese no cultivo da biomassa. Essa premissa só é correta se o uso da biomassa não estiver atrelado ao desmatamento. Ou seja, é necessário que a biomassa usada provenha de florestas sob práticas de manejo sustentável.

Não se pode esquecer, também, que esses valores não contabilizam as emissões oriundas de toda a cadeia produtiva do combustível fóssil. Segundo a IEA (2004), as emissões veiculares representam de 84% a 88% do total das emissões da cadeia de produção dos combustíveis fósseis. Para corroborar esse número, Szklo e Schaeffer (2007) afirmam que de 7% a 15% do petróleo produzido são consumidos nas refinarias.

Ademais, de acordo com Macedo, Leal e Silva (2004), existe uma baixa emissão de CO₂ na fase de produção de biocombustíveis, próximo de 10% de emissão que o mesmo volume de gasolina emitiria, já que são utilizados de 8% a 10% de energia fóssil para produzir o biocombustível.

Para o cálculo das emissões de CH₄ e N₂O dos modais ferroviário, hidroviário e aeroviário, utiliza-se a metodologia apresentada na Equação 2 (IPCC, 2006):

$$E^{GEE} = CC_i \cdot FE_i \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde E^{GEE} representa as emissões dos gases CH₄ ou N₂O, em quilos, C_i é o consumo do combustível i , em terajoules, e FE_i é o fator de emissão do combustível i , em kg/TJ.

Para o modal rodoviário, a abordagem empregada é mais detalhada que a de *Tier 1*, próxima do que é definido como *Tier 2* pelo IPCC, e está descrita na Equação 3 (IPCC, 2006):²⁵

²⁵ A abordagem exata de *Tier 2* do IPCC (2006) envolve ainda especificação do tipo de controle de emissões (e.g. sem controle, conversor catalítico etc.), o que não foi utilizado neste estudo, tampouco em Brasil/MCTI, 2010.

$$E_i^{GEE} = CC_{ij} \cdot FE_{ij} \text{ (Eq. 3)}$$

Onde E_i^{GEE} é a emissão (em kg) do gás de efeito estufa em questão (CH_4 ou N_2O) pelo tipo de veículo i ; CC_{ij} é o consumo de combustível j (em TJ) pelo tipo de veículo i e FE_{ij} é o fator de emissão do tipo de veículo i ao utilizar o combustível j (em kg/TJ).

Essa metodologia foi aplicada em conjunto com as seguintes premissas e dados de entrada:

- Considera-se um percentual de 25% de etanol anidro sobre a gasolina C durante todo o período e aplica-se o fator de emissão médio de 2005 utilizado pelo então Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (2010) para todo o período (2005 é o último ano calculado pelo documento do MCTI). Para motocicletas, que não são contempladas no *Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa*, utilizam-se os mesmos fatores de emissão de automóveis leves. Por simplificação, considera-se o consumo de diesel B0 durante todo o período.
- No caso de modais em que ocorrem viagens internacionais (basicamente no transporte aéreo e marítimo), o IPCC (2006) recomenda o cálculo separado das emissões decorrentes do transporte nacional e internacional. Não é realizada essa desagregação nos cálculos apresentados.
- O fator de emissão do GNV é obtido a partir de BRASIL/MMA (2014).

Com base nessas referências, os fatores de emissão utilizados são apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 – Fatores de Emissão de CH_4 e N_2O

Modal	Categoria	Combustível	Fator de Emissão de CH_4 (kg CH_4 /TJ)	Fator de Emissão de N_2O (kg N_2O /TJ)
Rodoviário	Automóvel leve	Etanol	4,7	1,7
Rodoviário	Automóvel leve	Gasolina A	3	1,98
Rodoviário	Comercial leve	Etanol	4,8	2
Rodoviário	Comercial leve	Gasolina A	2,7	1,98
Rodoviário	Comercial leve	Diesel	5,5	0,6
Rodoviário	Motocicleta	Etanol	4,7	1,7
Rodoviário	Motocicleta	Gasolina A	3	1,98
Rodoviário	Ônibus	Diesel	6,1	0,6
Rodoviário	Caminhão	Diesel	6,4	0,6
Rodoviário	Automóvel leve	GNV ²⁶	0,00264	0,0003756
Ferrovário	–	Diesel	5	0,6
Hidroviário	–	Diesel	5	0,6
Hidroviário	–	Óleo combustível	5	0,6
Aéreo	–	Querosene de aviação	0,5	2
Aéreo	–	Gasolina de aviação	0,5	2

Fonte: Elaboração própria a partir de BRASIL/EPE, 2014a; IPCC, 2006; BRASIL/MCTI, 2010; BRASIL/MMA, 2014

²⁶ Diferentemente dos demais energéticos, as unidades dos fatores de emissão de GNV na Tabela 34 são kg CH_4 /m³ e kg N_2O /m³.

O resultado da aplicação da metodologia descrita está disposto na Tabela 33, para o metano, e na Tabela 34, para o óxido nitroso. Cabe destacar que as emissões de CH₄ e N₂O oriundas da combustão de biomassas devem ser contabilizadas, pois tais gases não foram fixados da atmosfera quando do crescimento da biomassa, ao contrário do CO₂. No ano de 2012, as emissões totais de CH₄ foram de 15.238 toneladas, e as emissões de N₂O totalizaram 3.887 toneladas.

Tabela 33 – Emissões Totais de CH₄ por Combustível

(tCH ₄)	Diesel	Etanol anidro	Etanol hidratado	Gasolina A	Gasolina de Aviação	GNV	Óleo Combustível	Querosene de Aviação
2002	6.010	610	420	1.628	1	3	155	65
2003	6.126	635	387	1.696	1	4	146	46
2004	6.344	653	396	1.746	1	4	164	50
2005	6.572	658	491	1.759	1	5	169	54
2006	6.798	649	670	1.736	1	6	153	50
2007	7.102	641	929	1.714	1	7	195	55
2008	7.564	638	1.258	1.704	1	6	217	59
2009	8.007	663	1.489	1.771	1	6	206	60
2010	8.620	754	1.443	2.011	1	5	202	67
2011	9.423	905	1.121	2.409	1	5	206	76
2012	10.173	1.010	1.043	2.688	1	5	238	80

Fonte: Elaboração a partir de BRASIL/ANP, 2015; BRASIL/EPE, 2014a; IPCC, 2006; BRASIL/MCTI, 2010; BRASIL/MMA, 2012, 2014

Tabela 34 – Emissões Totais de N₂O por Combustível

(tN ₂ O)	Diesel	Etanol Anidro	Etanol Hidratado	Gasolina A	Gasolina de Aviação	GNV	Óleo Combustível	Querosene de Aviação
2002	578	224	155	1.086	4	4	19	262
2003	589	233	142	1.131	4	5	18	186
2004	610	240	146	1.164	4	6	20	199
2005	632	242	181	1.173	4	7	20	216
2006	655	239	247	1.157	5	9	18	202
2007	684	236	343	1.143	5	10	23	222
2008	728	234	464	1.136	4	9	26	238
2009	770	244	549	1.182	4	8	25	239
2010	829	278	532	1.343	4	8	24	270
2011	905	334	413	1.611	5	7	25	302
2012	977	373	385	1.799	5	7	29	318

Fonte: Elaboração a partir de BRASIL/ANP, 2015; BRASIL/EPE, 2014a; IPCC, 2006; BRASIL/MCTI, 2010; BRASIL/MMA, 2012, 2014

Uma forma de comparar emissões de diferentes GEE, em termos de carbono equivalente (CO₂eq), é por meio da métrica do potencial de aquecimento global (em inglês: *global warming potential* – GWP). Neste estudo, as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O são ponderadas pelo potencial de aquecimento global, em 100 anos, de acordo com o *Quinto Relatório de Avaliação sobre Mudanças Climáticas*, do IPCC (GWP 100 AR5), de, respectivamente, 1, 28 e 265, para se chegar ao valor de emissões em dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) (IPCC, 2014). Trazidas à métrica comum de CO₂eq, as emissões de CH₄ e N₂O por modal são apresentadas na Tabela 35.

Tabela 35 – Emissões de CH₄ e N₂O em CO₂eq por Modal

(GgCO ₂ eq)	Rodoviário	Ferroviário	Hidroviário	Aéreo	Total
2002	805	8	13	98	924
2003	826	8	12	88	934
2004	850	9	13	94	967
2005	878	10	14	98	1.000
2006	907	11	13	99	1.030
2007	950	12	16	109	1.087
2008	1.015	12	18	116	1.161
2009	1.089	11	17	120	1.236
2010	1.179	12	17	139	1.347
2011	1.289	12	16	154	1.471
2012	1.393	13	19	161	1.587

Fonte: Elaboração a partir de BRASIL/ANP, 2015; BRASIL/EPE, 2014a; IPCC, 2006; BRASIL/MCTI, 2010; BRASIL/MMA, 2012, 2014

Nota-se que o modal rodoviário continua a ser o principal emissor do transporte, respondendo por quase 90% da emissão total de CH₄ e N₂O do setor. O modal rodoviário é também aquele que apresentou maior aumento percentual ao longo dos 11 anos analisados: houve incremento de 73% nas suas emissões, que equivale a um aumento anual de aproximadamente 5,5%. As emissões totais de GEE, contabilizando as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O, para o setor de transportes, para o período de 2002 a 2012, são apresentadas na Tabela 36.

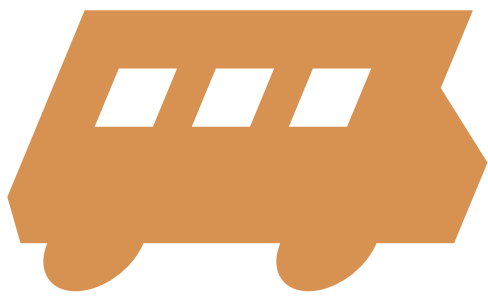
Tabela 36 – Emissões Totais de GEE por Modal

(GgCO ₂ eq)	Rodoviário	Ferroviário	Hidroviário	Aéreo	Total
2002	115.506	2.133	3.294	9.387	130.321
2003	115.674	2.105	3.035	6.727	127.541
2004	122.672	2.399	3.485	7.179	135.737
2005	123.130	2.540	3.575	7.789	137.035
2006	127.375	2.814	3.453	7.313	140.955
2007	131.366	2.998	4.253	8.030	146.646
2008	136.626	3.069	4.618	8.582	152.895
2009	134.574	2.976	4.323	8.636	150.509
2010	151.085	2.957	4.386	9.741	168.169
2011	166.064	2.934	4.218	10.887	184.103
2012	182.514	3.010	5.052	11.478	202.054

Fonte: Elaboração a partir de BRASIL/ANP, 2015; BRASIL/EPE, 2014a; IPCC, 2006; BRASIL/MCTI, 2010; BRASIL/MMA, 2012, 2014

Esses valores são coerentes com o disposto na TCN, que calculou a emissão do setor de transportes em 135.182 GgCO₂eq no ano de 2005, e 168.364 GgCO₂eq em 2010 (MCTI, 2016). Portanto, a diferença é insignificante e derivada do procedimento de modelagem adotado neste estudo, que exige o detalhamento das emissões por modais e combustível para a construção *a posteriori* de cenários de baixo carbono para o setor.

No ano de 2005, o setor de transportes representou aproximadamente 41% das emissões do setor de energia no Brasil – cujo total foi de 328.808 Gg CO₂eq, conforme Brasil/MCTI (2010) –, que engloba também os subsetores energético, industrial, residencial, comercial, público e a agricultura. Se consideradas as emissões totais do país, o transporte foi responsável por 7% das emissões nacionais – de 2.032.260 Gg CO₂eq, conforme Brasil/MCTI (2010). Em 2010, o transporte aumentou sua participação nas emissões do setor energético para 48% – de 347.974 Gg CO₂eq, conforme Brasil/MCTI (2016) –, e nas emissões nacionais para 20% – de 832.398 Gg CO₂eq, conforme Brasil/MCTI (2016).



Descrição das melhores tecnologias disponíveis, substituição modal e aspectos comportamentais no setor de transportes

Capítulo

3

3 DESCRIÇÃO DAS MELHORES TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS, SUBSTITUIÇÃO MODAL E ASPECTOS COMPORTAMENTAIS NO SETOR DE TRANSPORTES

Este capítulo detalha as opções tecnológicas de mitigação das emissões de GEE no setor de transportes. São apresentadas as melhores tecnologias e práticas disponíveis para o setor, com os custos associados e os ganhos energéticos envolvidos, quando disponíveis na literatura. Tendo em vista que o setor demanda diferentes tipos de combustíveis, o foco é dado à redução do consumo de energia. O potencial de mitigação de GEE de cada medida, assim como a combinação entre elas, vai depender do cenário para os quais serão viabilizadas.

Diante da relevância do modal rodoviário nas emissões totais do setor, é dada atenção especial para as tecnologias dos veículos rodoviários leves e pesados, discutindo-se as tecnologias incrementais, ou seja, disponíveis atualmente e que não exigem mudança estrutural significativa, e as tecnologias avançadas, que, apesar de comercialmente disponíveis, têm custo elevado, como o caso dos veículos a baterias e a célula a combustível. Ademais, aspectos comportamentais e substituição modal são discutidos como opções de mitigação de emissões de GEE para o setor.

3.1 TECNOLOGIA VEICULAR INCREMENTAL

3.1.1 VEÍCULOS AUTOMOTIVOS

Atualmente, os ganhos incrementais de eficiência energética dos veículos automotores estão associados à redução das perdas da conversão da energia final em energia útil²⁷ no veículo. Desse modo, a partir da implementação de medidas que aumentem o rendimento do processo de conversão de energia, é possível a melhora da eficiência do ciclo de funcionamento do automóvel, resultando na economia de combustível e na redução de emissão de GEE (ATABANI et al., 2011).

²⁷ Energia final é a energia na forma demandada pelos consumidores finais (por exemplo, gasolina ou diesel), enquanto energia útil é a energia necessária para realizar um trabalho específico (por exemplo, movimentação do veículo).

No âmbito do veículo leve, com as tecnologias comercialmente disponíveis, somente cerca de um quinto da energia presente em um litro de combustível, como a gasolina, é efetivamente utilizado para impulsionar o veículo. Os quatro quintos restantes de energia são perdidos, em sua maioria, no sistema de transmissão, principalmente por meio do calor residual, perdido no sistema de escapamento, no sistema de arrefecimento e nas pastilhas de freio (IEA, 2012b). Na Figura 51, estão mensuradas as principais perdas no veículo leve durante o processo de locomoção urbana combinado com a direção em autoestrada.

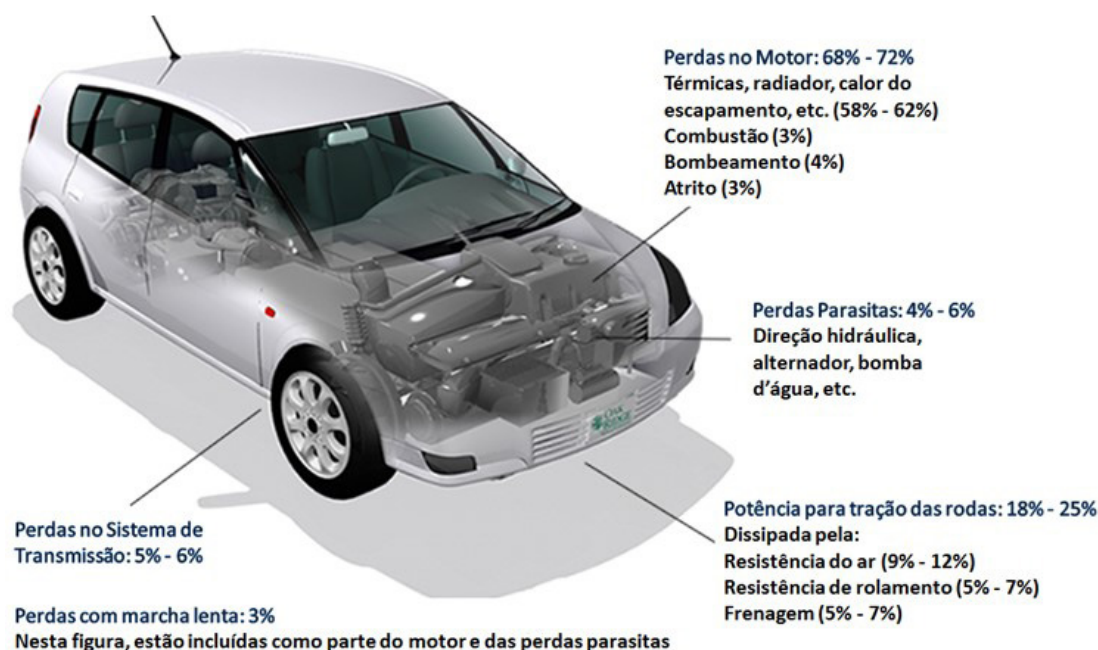


Figura 51 – Perdas de Energia nos Veículos Leves

Fonte: USA/FUEL ECONOMY, 2014a

As principais perdas dentro do fluxo energético, desde a energia química proveniente do tanque de combustível até sua conversão em energia mecânica para propulsão do veículo, estão interiorizadas no funcionamento do motor, abrangendo o movimento generalizado do veículo, sistema de tração, transmissão, perdas parasitas e perdas em marcha lenta (LUTSEY, 2012). Entretanto, as porcentagens ilustradas na Figura 51 podem variar amplamente de acordo com as condições de condução (USA/FUEL ECONOMY, 2014a).

Um aspecto importante está associado ao consumo de energia do veículo parado em semáforos e no tráfego, ligado em marcha lenta. O fato de o veículo se manter parado, porém em funcionamento, origina perdas energéticas (HOLMBERG; ANDERSSON; ERDEMIR, 2012), sendo necessária a aplicação de tecnologias que reduzam ou cessem a operação de alguns sistemas nos momentos em que não estão funcionando.

Diferentemente dos veículos leves, os veículos destinados ao transporte de carga têm o peso variável, devido às diversas finalidades e funções das cargas transportadas, assim como maior quantidade de componentes, como cabine do condutor, corpo do veículo, além de eixos maiores, os quais devem ser combinados de forma a otimizar a interação individual de todos os componentes (UTG, 2012). A Figura 52 apresenta as principais perdas nos veículos pesados durante o processo de locomoção em rodovia.

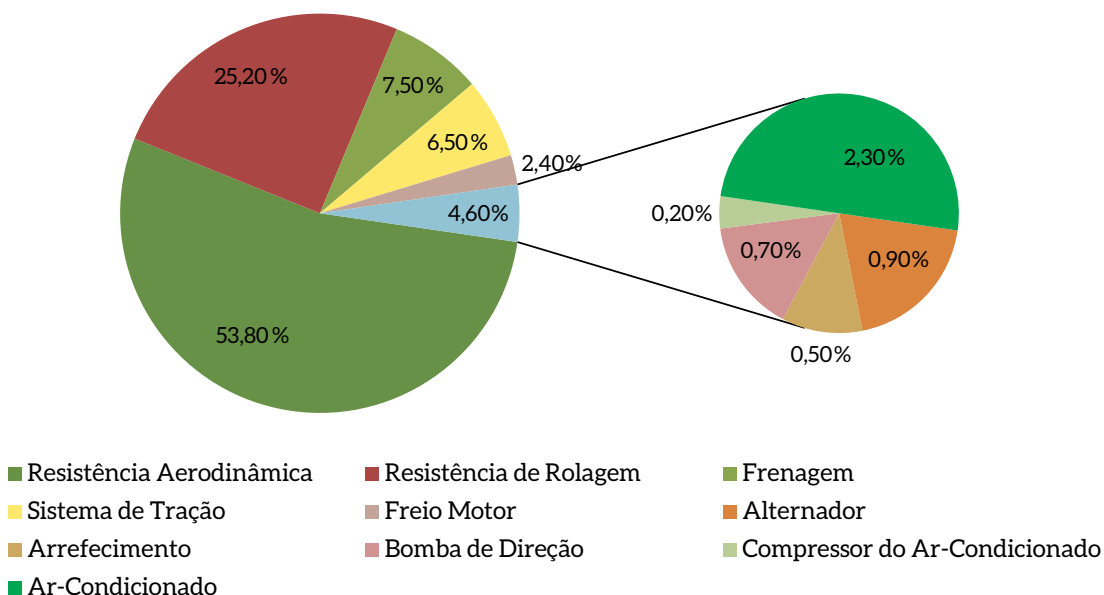


Figura 52 – Perdas de Energia nos Veículos Pesados

Fonte: UTG, 2012

Apesar de não desenvolverem grandes velocidades, a área de contato com o vento dos veículos pesados é significativa. Tal fato, aliado à condição da pavimentação da estrada, faz com que as perdas geradas pela resistência aerodinâmica e pela resistência de rolagem sejam as mais elevadas, como mostra a Figura 52, ocasionando o consequente aumento do consumo específico de combustível (UTG, 2012).

De fato, as perdas geradas pela força de arrasto do vento sobre os veículos, também chamadas de forças aerodinâmicas, são fonte de amplos estudos. Atrrelada às altas velocidades, a força aerodinâmica gerada é analisada no *design* dos veículos, especialmente nos veículos leves esportivos. Veículos com formas mais suaves reduzem significativamente as perdas energéticas originadas pela resistência do ar (ATABANI et al., 2011).

As forças aerodinâmicas são diretamente proporcionais à área de contato e ao quadrado da velocidade do veículo. Isso gera a relação mostrada na Figura 53, onde se observa que as perdas em um veículo automotor pesado são muito maiores quando o veículo desenvolve velocidades médias mais elevadas, em detrimento das perdas geradas pelos pneus, que não variam de forma significativa com a velocidade (BAKER et al., 2009).

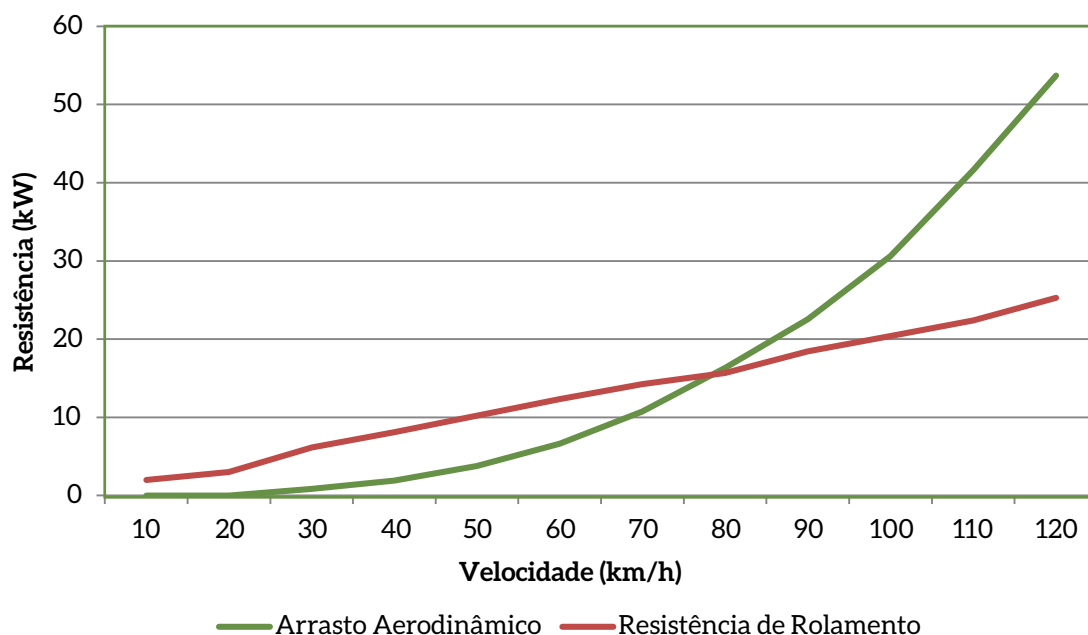


Figura 53 – Relação entre Velocidade do Veículo e as Resistências Aerodinâmica e de Rolagem

Fonte: BAKER et al., 2009

A força de resistência de rolamento, por sua vez, é causada pela deformação do pneu à medida que rola sobre uma superfície. Essa resistência dissipa parte da energia, contribuindo para a soma total das perdas energéticas (SIVAK; SCHOETTLE, 2012). Desse modo, a resistência de rolagem está diretamente relacionada com o projeto do pneu, sendo influenciada pelo material utilizado, tamanho e estrutura, assim como por fatores externos, como pressão de calibragem, alinhamento, carga e temperatura. Com o intuito de reduzir os esforços, deformação e consequente aumento da resistência de rolamento dos pneus, algumas ações podem ser feitas independentemente da tecnologia utilizada, o que garante um funcionamento ótimo do pneu (IEA, 2007).

Para o caso específico dos veículos pesados, a incorreta calibragem dos pneus, em cada um dos eixos do caminhão (eixo frontal, eixo da direção e eixo do semirreboque),²⁸ aumenta consideravelmente a intensidade energética do conjunto (TAGHAVIFAR; MARDANI, 2013), conforme mostrado na Figura 54, para a velocidade específica de 88 km/h.

28 Eixo de direção é o eixo que liga as rodas diretamente à barra de direção do veículo, sendo responsável pela mudança de direção do veículo. Eixo frontal é o eixo existente na parte frontal no caminhão (cavalo), que não o eixo de direção. Eixos do semirreboque são todos os eixos que interligam as rodas do semirreboque.

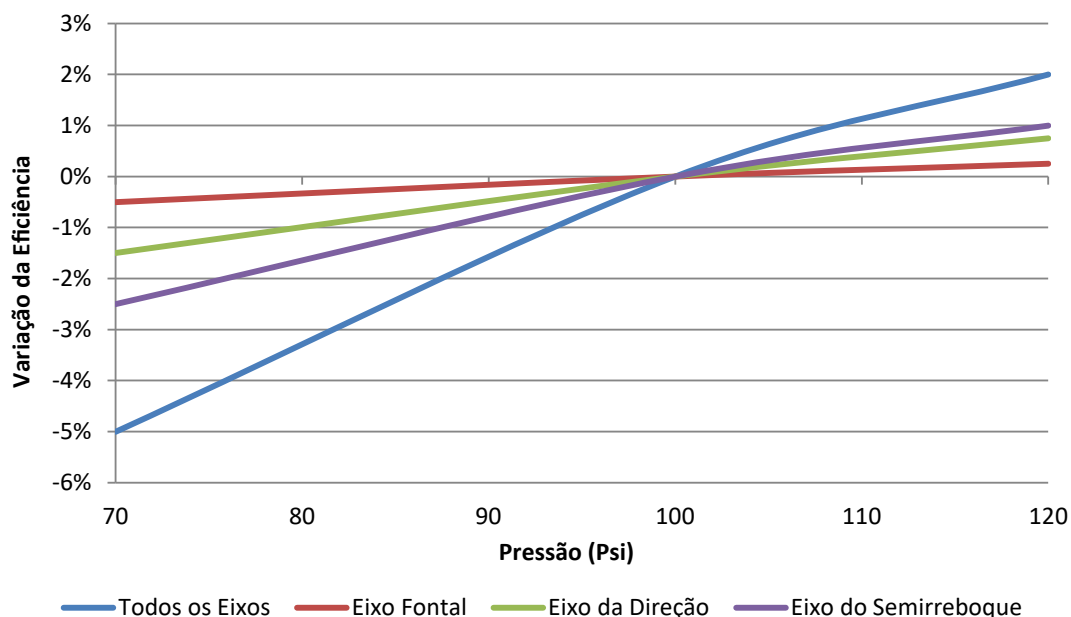


Figura 54 – Efeito da Calibragem dos Pneus no Consumo de Combustível

Fonte: GOODYEAR, 2004

É importante observar que a pressão ideal a ser utilizada nos pneus deve ser avaliada conforme a temperatura e altitude local. Além disso, o pneu deve ser calibrado sempre conforme especificações do fabricante. Apesar de o aumento de pressão melhorar a eficiência do veículo, a sobrepressão, além dos limites estabelecidos pelo fabricante, pode gerar o desgaste prematuro do pneu. Outro fator de influência direta no consumo energético de caminhões relacionado ao sistema de pneus é o alinhamento das rodas. O alinhamento incorreto gera, além de maiores perdas, maior desgaste dos pneus e diminuição da velocidade desenvolvida pelo caminhão. Estima-se que as perdas geradas podem chegar a 2,2% em condições médias de desalinhamento, podendo ser ainda superiores em condições mais extremas (GOODYEAR, 2004). Assim, novos projetos de pneus e materiais, além de sua correta manutenção, contribuem para tornar essa ação mais eficiente, reduzindo o montante das perdas energéticas (HOLMBERG; ANDERSSON; ERDEMIR, 2012).

Além disso, toda a energia utilizada para superar a inércia do veículo em sua frenagem, bem como parte da energia demandada para sua propulsão, é integralmente perdida sob a forma de calor. Por conseguinte, as perdas energéticas estão diretamente associadas ao peso do veículo. Assim, a redução do desperdício nesse processo pode ser feita com a utilização de materiais e tecnologias mais leves (BANDIVADEKAR et al., 2008b).

A seguir, são apresentadas as tecnologias existentes e em desenvolvimento que contribuem efetivamente para a economia de combustível e, consequentemente, minimizam as perdas de energia nos veículos leves e pesados e redução das emissões de GEE.

3.1.1.1 AERODINÂMICA

A resistência aerodinâmica, definida pelo atrito entre a superfície da carroceria do veículo e o ar, afeta de forma direta o desempenho do automóvel, o consumo de combustível e sua estabilidade, de modo que a eficiência do veículo ao atravessar o ar pode ser mensurada por meio do coeficiente adimensional de resistência aerodinâmica, ou coeficiente de arrasto, representado por C_D (ATABANI et al., 2011). Esse coeficiente é exibido na Figura 55 para os diferentes tipos de veículo, sendo que, quanto menor o valor do C_D , melhor a aerodinâmica do veículo.

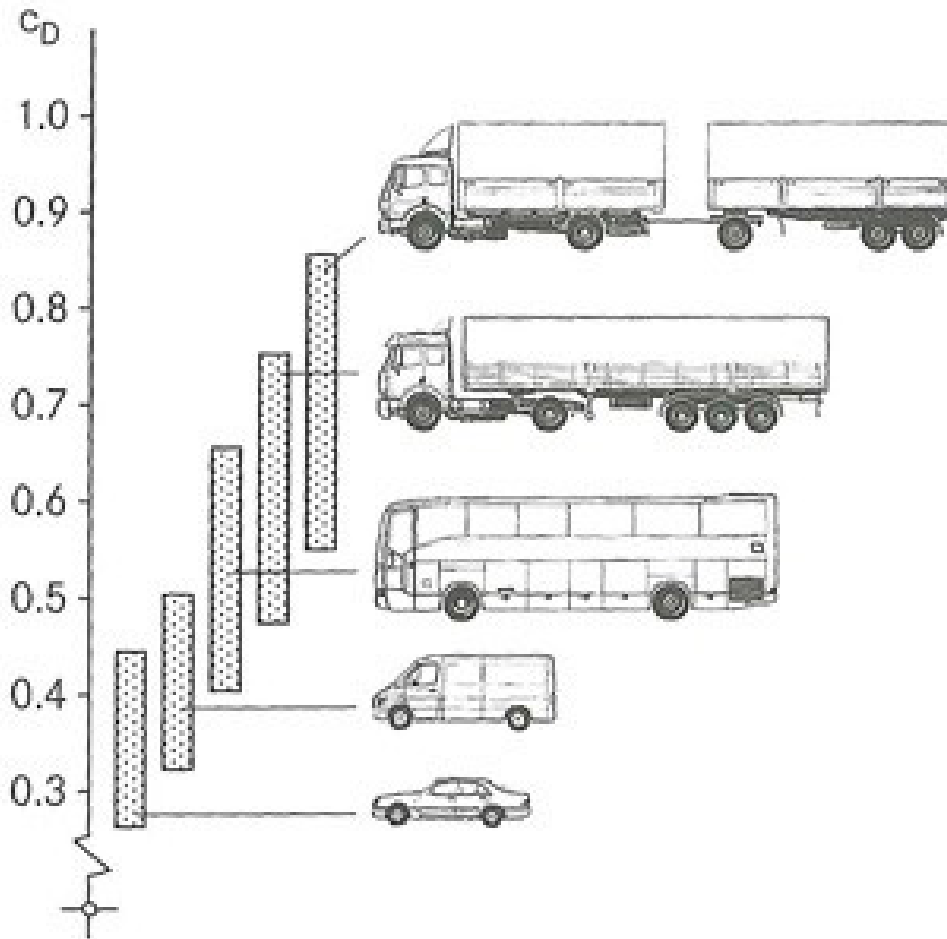


Figura 55 – Coeficiente de Arrasto para Diferentes Tipos de Veículos

Fonte: PART, 2014

A força de resistência do ar é diretamente proporcional ao coeficiente de arrasto, à projeção da área frontal do veículo e proporcional ao quadrado da velocidade do automóvel (ATABANI et al., 2011). A Figura 56 ilustra as linhas de força de resistência do vento em um veículo leve de passeio.



Figura 56 – Distribuição do Vento nos Veículos Leves

Fonte: CIRCULA SEGURO, 2014

A redução de 10% do coeficiente de arrasto dos veículos leves, cujos valores são próximos a 0,3, pode diminuir o consumo de combustível entre 2% e 3,5% (ATABANI et al., 2011). Os custos considerados para redução de 5% a 10% no coeficiente de arrasto variam entre US\$ 40 e US\$ 50. Entretanto, tais valores de redução são considerados agressivos, pois se fazem possíveis por meio de instalação de *spoilers*, redução da largura e altura da cabine, acentuação da inclinação das janelas e do para-brisa e eliminação dos espelhos retrovisores, o que compromete a funcionalidade do veículo e exige mudança nas normas de segurança e melhoria no sistema de visão (CANADA/NRC, 2011).

Os ganhos de eficiência energética com a redução da ação de forças aerodinâmicas em veículos pesados, por sua vez, são um somatório de pequenas adequações no cavalo e no semirreboque.²⁹ Em linhas gerais, a distribuição do vento em um veículo pesado típico em movimento é apresentada na Figura 57.

²⁹ Cavalo é o conjunto formado por cabine, motor e rodas de tração do caminhão com eixo simples ou duplo. Pode ser engatado em vários tipos de carretas e semirreboques para o transporte. Semirreboque é um veículo de carga independente e sem meio próprio de tração que apoia parte de sua unidade e de seu peso a um caminhão trator (cavalo).



Figura 57 – Distribuição do Vento nos Veículos Pesados

Fonte: IVECO, 2014

As ações sobre as perdas aerodinâmicas passam, no caso de veículos pesados, a focar em reduzir a área de contato do veículo com o vento, com ações construtivas, como a redução da altura do veículo, e ações de adequação do veículo, como a instalação de aerofólios com o intuito de tornar o cavalo e o semirreboque um único corpo para o arrasto. Algumas das ações implementadas podem ser observadas na Figura 58.

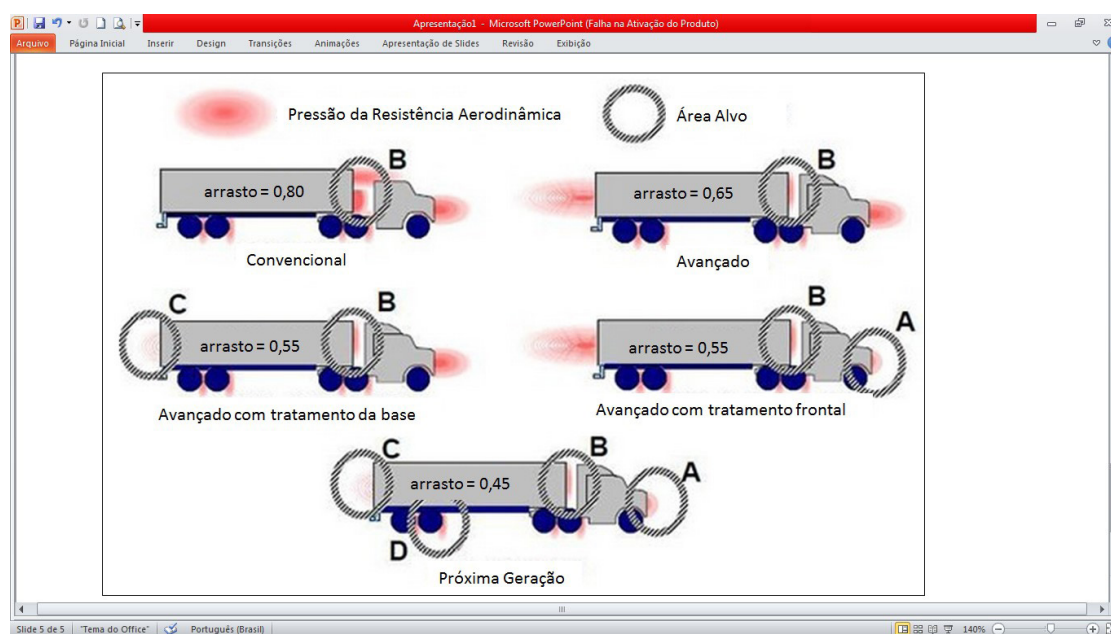


Figura 58 – Redução do Coeficiente de Arrasto dos Caminhões

Fonte: HOLLANDA, 2011

De acordo com Liimatainen et al. (2014), os ganhos de eficiência devido a cada uma das ações possíveis divergem de forma geral na literatura, como mostrado na Tabela 37.

Tabela 37 – Ganhos de Eficiência Aerodinâmica dos Veículos Pesados (%)

Tecnologias	(DFT, 2010a)	(BAKER et al., 2009)	(FTA, 2012)
Entrada de ar frontal	<1%	-	-
Carenagem na parte superior da cabine	4%	-	4%
Borda lateral das cabines	<1%	7%	-
Carenagem lateral no semirreboque/trailer	<1%	-	1%
Carenagem frontal no semirreboque/trailer	3%	-	-
Basculante com aerodinâmica	<1%	-	-
Trailer aerodinâmico (forma de gota) ³⁰	10%	10%	6%
Semirreboque com telhado inclinado	5%	-	5%
Redução de altura do veículo	-	-	3%
Redução de carga de vento nos pneus	2%	4%	-

Fonte: Elaboração própria a partir de LIIMATAINEN et al., 2014

Tal fato pode ser justificado, entre outros motivos, pela diferença da temperatura e altitude dos ambientes testados, pela metodologia utilizada e, principalmente, pelo grupo de análise dos dados. Como há diferenciação entre os avanços das soluções adotadas em cada país, o grupo de análise e seu país de origem interferem bastante nos resultados.

A solução empregada deve ser bastante específica ao conjunto de tração e o semirreboque. Dependendo do tipo de carga transportada, a solução aerodinâmica pode mudar drasticamente. Estima-se que o custo pode variar entre US\$ 3.000 e US\$ 4.000.

3.1.1.2 REDUÇÃO DE MASSA

No decorrer dos anos, os veículos, em especial os leves, tiveram aumento relativo de peso no intuito de acompanhar algumas demandas específicas de mercado, como conforto e segurança. A instalação de acessórios como vidro elétrico, ar-condicionado, assentos aquecidos, sistema de navegação, alto-falantes adicionais, tensores de cintos de segurança, *air bags* laterais e sistemas de controle de freio aumenta o número de funcionalidades do veículo de modo a adequá-lo às novas tendências, incrementando, porém, o peso do veículo, que exige motores mais potentes e, conseqüentemente, consomem mais combustíveis (ATABANI et al., 2011).

Na intenção de reverter essa tendência, a oportunidade de reduzir o uso de combustível pode ser vista na redução da massa do veículo. Ao diminuir o peso, reduz-se a resistência de rolamento e, subseqüentemente, a energia necessária para locomover o veículo, alcançando o objetivo final de reduzir o consumo de combustível (IEA, 2012b). A relação aproximada entre redução do peso dos veículos leves e pesados, ambos considerados sem passageiros e sem cargas, e consumo de combustível pode ser analisada na Figura 59.

30 Trailer construído de forma aerodinâmica, com a parte frontal arredondada e a extremidade posterior afinada, em um formato que lembra uma gota.

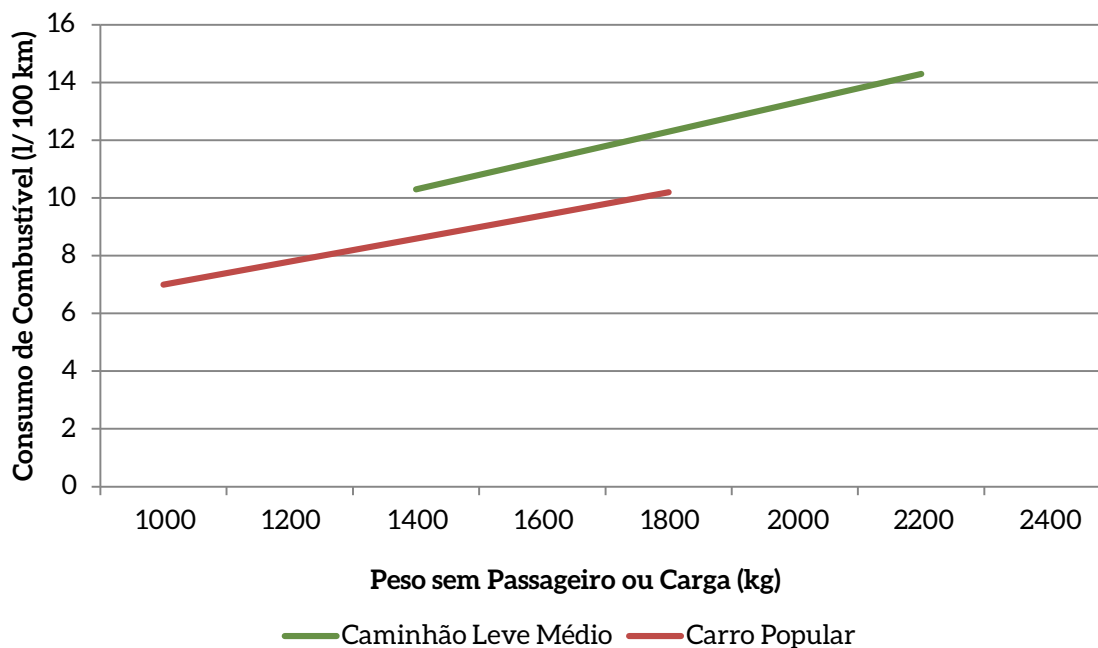


Figura 59 – Relação entre Consumo de Combustível e Peso dos Veículos Leves e Pesados

Fonte: BANDIVADEKAR et al., 2008a

Para veículos leves, a redução de peso pode ser implementada substituindo os materiais utilizados por outros mais leves, assim como alterando o *design* e reduzindo o tamanho do veículo (BANDIVADEKAR et al., 2008a). A Figura 60 exibe a distribuição média da massa dos veículos leves em seus subsistemas, de modo que se pode observar que a maior parte do peso do veículo concentra-se no sistema de transmissão, no chassi e no corpo do veículo, que, atualmente, são produzidos a partir de materiais como ferro e aço (ATABANI et al., 2011).

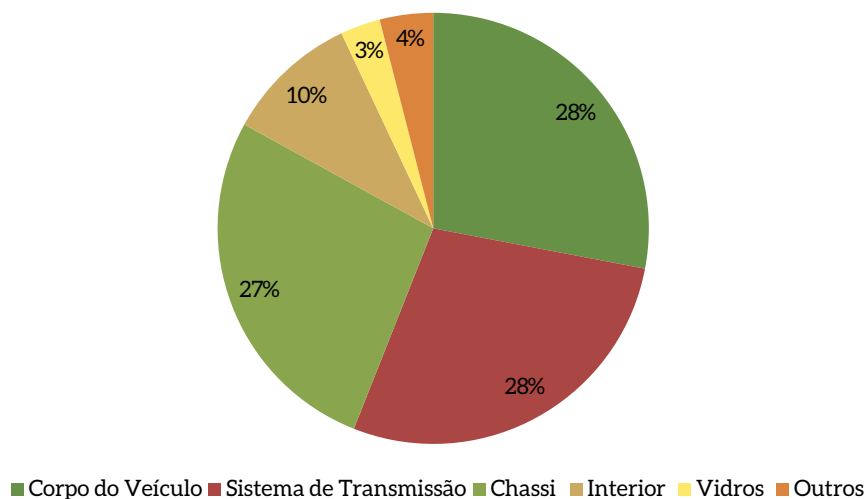


Figura 60 – Distribuição do Peso dos Veículos Leves

Fonte: BANDIVADEKAR et al., 2008a

A substituição dos materiais utilizados nos veículos automotores por materiais mais leves tem sido feita gradualmente. Devido à grande variedade de materiais e processos de fabricação possíveis, estima-se o custo de US\$ 1,20 a US\$ 13,20 por quilo reduzido dos veículos leves, mantendo o tamanho e o desempenho constante. Desse modo, reduzindo-se 10% do peso do veículo, obtém-se redução no consumo de combustível que varia entre 4,5% e 8,0% (BANDIVADEKAR et al., 2008a). Para redução de 10% no peso do veículo por meio da aplicação do aço de alta resistência, tem-se o custo equivalente de US\$ 300, enquanto, para a redução de 25% do peso do veículo por meio da aplicação de peças de alumínio, tem-se o valor em torno de US\$ 1.000 (IEA, 2012b).

Assim, para os veículos leves, o aço de alta resistência e o alumínio são os mais fortes candidatos para substituição dos materiais pesados, que podem ser utilizados principalmente no motor, rodas, sistema de transmissão e tração (BANDIVADEKAR et al., 2008a). Outros candidatos incluem também o magnésio, que pode compor painel, armação dos assentos e tampas de válvulas, seguido dos compósitos poliméricos, reforçados com fibra de vidro ou de carbono, e plásticos, que podem ser utilizados na composição da estrutura interior da porta, teto e suporte para o painel (BANDIVADEKAR et al., 2008a). Entretanto, estes últimos ainda representam dificuldade no que diz respeito ao custo, pois têm capacidade para reduzir o peso do veículo em até 40%, porém a um custo equivalente de US\$ 20.000 por veículo. Assim, o desafio da infraestrutura de entrega de grandes quantidades e o descarte após o fim da vida útil do automóvel são barreiras que inibem a participação dessa tecnologia (IEA, 2012b).

A distribuição de massa em um veículo pesado é mostrada na Figura 61, a qual conduz à conclusão de que, para os veículos pesados, boa parte da solução para redução no consumo de combustível também está na substituição dos materiais atualmente usados por outros mais leves, como alumínio, plástico, fibra de carbono e fibra de vidro. Entretanto, em muitos casos, essas soluções não têm a inserção devida, pois os veículos ainda necessitam da robustez e da segurança que os materiais utilizados atualmente fornecem, em especial o aço (IEA, 2012b). A solução discutida é centralizada, portanto, no uso de ligas de aço tão resistentes quanto as atuais e mais leves do que estas. Estima-se que tais ações poderiam levar à redução de cerca de 10% do peso do veículo (IEA, 2012b).

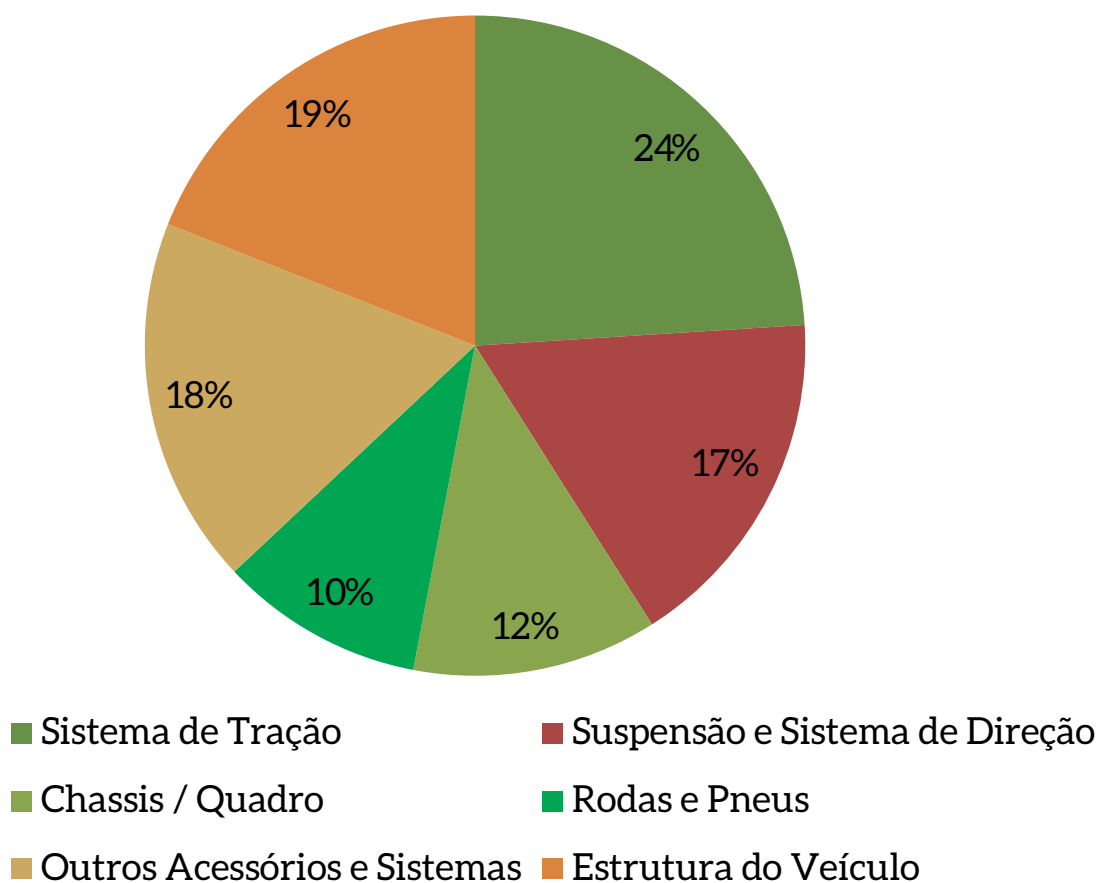


Figura 61 – Distribuição do Peso dos Veículos Semipesados e Pesados

Fonte: CANADA/NRC, 2010

O uso de alumínio, fibra de carbono e fibra de vidro em veículos pesados ainda assim pode ser bastante útil. No caso do alumínio, os ganhos podem chegar a uma redução de peso entre 10% e 25% do sistema substituído. No caso da fibra de vidro e da fibra de carbono, a redução pode chegar a 40%, como analisado em um veículo leve.

Tais reduções de peso geram ganhos consideráveis quando se trata de consumo energético. De acordo com o National Research Council (2010), a cada 450 kg de redução de peso nos veículos, obtém-se um ganho entre 0,4% e 2,4% de consumo energético. Essa variação se dá principalmente pela diferença de peso entre as diversas categorias, sendo os veículos da classe semipesada e pesada mais próximos de 0,4% e os veículos de classe média mais próximos do ganho máximo de 2,4%. No caso de transporte pesado de passageiros, há ganho de 2% para cada 450 kg reduzidos, com potenciais de redução entre 10% e 20%, a depender do custo das tecnologias inseridas (IEA, 2012b). Esse é um ganho tecnológico de grande potencial, pois em praticamente sua totalidade as soluções estão plenamente disponíveis no mercado, com preços que variam entre US\$ 2.000 e US\$ 5.000 por veículo.

Dois pontos nessa discussão são extremamente importantes. O primeiro é que outras opções tecnológicas podem interferir positiva ou negativamente no peso dos veículos. Nesse caso, a relação estabelecida entre eficiência por quilo também é válida, e o *trade-off* do ganho gerado pelo novo componente contra a perda de eficiência gerada pelo acréscimo de peso de sua inserção deve ser analisado, ainda que essa informação não seja facilmente obtida.

O segundo ponto é que há um ganho indireto na redução de peso dos veículos para transporte de carga. Como há regulamentação de peso a ser transportado pelos veículos pesados, quando se reduz o peso do veículo vazio, há a possibilidade de aumento da carga transportada, o que, aliado a uma boa gestão logística, gera um efeito positivo na redução de viagens, por exemplo.

3.1.1.3 PNEUS E RODAS

O pneu é o único ponto de contato entre o veículo e o solo, devendo, portanto, alcançar o equilíbrio adequado entre seu desempenho, desgaste, distância de frenagem, aderência em curva e resistência de rolamento. A resistência de rolamento, discutida anteriormente, depende do peso do veículo, de sua velocidade, da qualidade da superfície da estrada e do coeficiente de atrito entre os pneus e a superfície. Por sua vez, o coeficiente de atrito de rolamento varia de acordo com o material do pneu, seu *design* e sua pressão de inflação (ATABANI et al., 2011).

Tendo em vista que a resistência de rolamento gera perdas energéticas, quanto menor seu valor, menor o consumo de combustível. Estima-se que, reduzindo a resistência de rolamento em 10%, obtém-se redução de 2% na demanda de energia (HOLMBERG; ANDERSSON; ERDEMIR, 2012). Dessa forma, podem-se enumerar duas maneiras de minimizar a resistência de rolamento. A primeira é dirigir com os pneus inflados corretamente e alinhados. A outra é a utilização de pneus fabricados com materiais que reduzem a resistência de rolamento em níveis adequados de inflação (ATABANI et al., 2011). Tal análise conduz à conclusão de que pneus parcialmente vazios, ou não calibrados de forma correta, tendem a aumentar a resistência de rolamento, fato que motiva alguns fabricantes de veículos a instalar monitores de baixa pressão nos pneus para avisar ao condutor quando eles não estiverem calibrados de forma correta, de modo a não comprometer a segurança e a economia de combustível (CANADA/NRC, 2011).

Entretanto, o desgaste de pneus de baixa resistência de rolamento ocorre de forma mais acelerada, assim como também pode comprometer a distância de parada do veículo. Para que essas desvantagens sejam contornadas e o desempenho do pneu não seja afetado, os custos incrementais associados a essa tecnologia são de 10% a 20% a mais em relação aos pneus convencionais (CANADA/NRC, 2011). Devido a esses fatores e aliado à introdução de sistemas de monitoramento de pressão dos pneus, considera-se que, para um potencial de melhoria de 5% no consumo de combustível, tem-se um custo equivalente entre US\$ 40 e US\$ 70 por veículo leve (IEA, 2012b).

Para o mercado de veículos pesados, os pneus apresentam diferentes formas construtivas que influenciam, entre outros parâmetros, o consumo energético. As opções amplamente apresentadas no mercado de pneus estão divididas em duas categorias: pneus de lonas radiais e pneus de tiras diagonais. A diferença entre os dois está na construção de suas carcaças. No pneu de tiras diagonais, a carcaça é composta de

lonas sobrepostas e cruzadas umas em relação às outras. Nesse tipo de pneu, quando há flexão da lateral, fruto da carga/peso exercida sobre o pneu, esta é transmitida à banda de rodagem. Nos pneus de tiras radiais, os fios da carcaça são orientados ao centro do pneu, dispostos em arcos perpendiculares ao plano de rodagem. Cintas sobrepostas complementam a construção, conferindo a estabilidade necessária no piso. Do ponto de vista do consumo energético, há um ganho com relação ao pneu de tiras diagonais. Como o pneu radial é feito como uma única carcaça, não há atrito entre suas partes internas, o que garante redução da temperatura interna. Além disso, a área de contato com o piso torna-se maior, já que o pneu radial não força a flexão da banda de rodagem. De acordo com a Goodyear (2004), a intensidade energética de um conjunto cavalo-semirreboque utilizando todos os pneus radiais é 5,9% inferior se comparada a um veículo do mesmo tipo usando todos os pneus de tiras diagonais.

Outra diferença básica entre as tecnologias presentes no mercado está na não utilização de câmara de ar. Além dos ganhos construtivos inerentes à tecnologia sem câmara de ar, que envolvem menos componentes (MICHELIN, 2009), há ganhos energéticos. Pneus sem câmara de ar apresentam consumo energético 2% inferior aos pneus convencionais sob as mesmas condições de uso (GOODYEAR, 2004).

O pneu de base larga (*wide base tire* – WBT) é outra tecnologia disponível que representa ganho considerável no uso energético. Essa forma construtiva de pneu já era utilizada na América do Norte desde a década de 1980. Entretanto, mudanças significativas ocorreram desde então. Naquela época, o WBT apresentava diâmetro maior e necessidade de calibragem com pressão consideravelmente maior, fato que gerava desconforto e problemas de segurança para os motoristas. Atualmente, o WBT tem forma similar aos pneus atualmente utilizados. Seu conceito básico é a substituição do conjunto de dois pneus por um único, cuja largura é equivalente àqueles substituídos, como mostra a Figura 62. A redução da resistência de rolamento se deve principalmente à redução da flexão dos flancos dos pneus, com menor deformação. Além disso, o WBT tem momento de inércia menor que o conjunto de dois pneus (ICCT, 2013). Esses e outros ganhos fazem com o que o WBT gere redução de 3% a 6% (NACFE, 2010), podendo chegar a 10% (IEA, 2012b), no consumo energético, dependendo da quantidade de eixos em que será utilizado.



Figura 62 – Pneu de Base Larga

Fonte: NACFE, 2010

Sucessivas evoluções ocorrem a cada ano no *design* de pneus e na utilização de materiais. Para pneus utilizados em veículos leves, estima-se a taxa de redução do atrito de rolamento variando entre 1,1% e 1,65% ao ano (BANDIVADEKAR et al., 2008a). Para os pneus utilizados em veículos pesados, de acordo com Duleep (2011), a redução da resistência de rolamento tem ocorrido ao passo de 0,7% ao ano. Para ambos os tipos de veículos, para cada 10% de redução da resistência de rolamento, tem-se redução entre 1% e 2% no consumo energético (IEA, 2007).

Apesar de essa tendência de longo prazo não indicar grandes avanços tecnológicos dos pneus com relação à eficiência energética, há diferenças entre a resistência de rolamento apresentada pelos produtos disponíveis. De acordo com a IEA (2007), no mercado dos EUA, enquanto o pneu de um veículo pesado de menor resistência de rolamento apresenta índice de 0,0055, o de maior resistência de rolamento apresenta índice de 0,0085. Nos casos europeu e japonês, cenários parecidos são apresentados. De maneira semelhante, no caso dos veículos leves, o menor valor para o coeficiente de atrito de rolamento é de 0,007 e o de maior valor é de 0,014, ou seja, uma variação de 50%.

Isso indica que ainda há espaço para penetração no mercado de pneus com baixa resistência de rolamento, mesmo em mercados onde há normas e regras de etiquetagem de pneus definidas. Para o caso brasileiro, essa tendência pode ser ainda maior, uma vez que a regulamentação e a etiquetagem de pneus estão em sua fase inicial.

Um fato importante é que se podem combinar as três tecnologias discutidas acima (aerodinâmica, redução de massa e pneus e rodas) no veículo. Por exemplo, redução de 10% na resistência de rolamento, combinada com diminuição nas resistências aerodinâmicas e na massa do veículo, pode gerar redução do consumo energético equivalente a 10%, com alguns ajustes de redimensionamento do sistema de tração e transmissão (CANADA/NRC, 2011).

3.1.1.4 Motor

Os motores de combustão interna podem ser divididos, basicamente, em dois tipos. O primeiro inclui motores de ciclo Otto, que utilizam gasolina, etanol ou gás natural e uma vela de ignição para inflamar a mistura ar/combustível. O outro inclui motores de ciclo diesel, ou motores de ignição por compressão, devido ao fato de a ignição ser feita a partir do aquecimento, por compressão, da mistura ar/combustível.

Globalmente, diversas tecnologias avançadas, focadas na eficiência dos processos de funcionamento do motor, foram desenvolvidas e estão presentes no mercado automobilístico. Algumas dessas tecnologias são aplicáveis para ambos os tipos de motores, diesel e Otto, enquanto outras tecnologias são específicas para cada tipo de motor.

Dentre os aspectos incrementais para eficiência do motor a ciclo Otto, destacam-se os fatores termodinâmicos, adequação do número e funcionalidade das válvulas, injeção direta de combustível, redução do tamanho e do atrito do motor, gerenciamento do aquecimento do motor e sistemas *start-stop*.

Em relação aos veículos a ciclo Otto, os fatores termodinâmicos podem ser aplicados a partir do sistema de combustão de queima rápida, o qual reduz o consumo energético de 2% a 3% a um custo que varia entre US\$ 50 a US\$ 100 (CANADA/NRC, 2011). No que diz respeito à adequação do número de válvulas, podem ser implementadas múltiplas válvulas. O uso, por exemplo, de quatro válvulas em vez de duas por cilindro resulta em redução no consumo de combustível de 2% a 5%, com custo incremental de US\$ 105 a US\$ 140 (ATABANI et al., 2011).

A funcionalidade das válvulas também pode ser melhorada, por exemplo, a partir do processo de bombeamento de válvula modulada. Tal processo pode ser realizado por meio da válvula de admissão com fechamento temporizado, que traz redução no consumo de 1% a 2% associado ao custo entre US\$ 18 e US\$ 70. Outra solução envolve o controle da superposição de válvulas, que atinge redução no consumo de combustível de até 5%, quando não associada à tecnologia de múltiplas válvulas, a um custo que varia de US\$ 35 a US\$ 190 por motor. Destaca-se também a possibilidade do uso de válvula de admissão reguladora, que pode ser do tipo válvula de sustentação variável discreta, que traz um benefício de 4% a 5% de redução no gasto energético a um custo que pode variar de US\$ 30 a US\$ 40 por cilindro, ou de US\$ 142 a US\$ 285 por veículo, ou do tipo válvula de sustentação variável contínua, que pode ser de sistema eletromecânico ou eletro-hidráulico, beneficiando a redução do consumo energético de 4% a 6% a um custo na faixa de US\$ 159 a US\$ 625 (ATABANI et al., 2011; IEA, 2012b; CANADA/NRC, 2011).

Baseando-se no fato de que o motor, ao locomover o veículo no trânsito urbano, não utiliza sua potência máxima, há, ainda, a possibilidade de desativação momentânea dos cilindros que não estão sendo utilizados, com o objetivo de otimizar o consumo energético do motor. Essa técnica é aplicável a motores de seis a oito cilindros, transformando-os em motores de três a quatro cilindros. Apesar da existência de protótipos de motores de quatro cilindros utilizando a técnica de redução do número de cilindros, a relação custo-benefício dessa implementação não é satisfatória (ATABANI et al., 2011). Estima-se o custo entre US\$ 162 e US\$ 220 para motores com seis cilindros, associado a uma economia de 4% a 6% no gasto energético, e entre US\$ 205 e US\$ 229 para motores de oito cilindros, associado a uma economia de 6% a 10% no gasto energético (CANADA/NRC, 2011).

Os benefícios no consumo de combustível também podem ser alcançados a partir de configurações de injeção direta de combustível que podem atingir um nível de redução no gasto energético em torno de 3% a um custo entre US\$ 234 e US\$ 485 (CANADA/NRC, 2011). Outra opção é a redução do tamanho do motor aliado a turboalimentação, que, quando em trânsito urbano, opera mais próximo do ponto de maior eficiência do motor e, quando em alta velocidade, a potência do motor é impulsioneada pelo turboalimentador. A partir dessa configuração, estima-se economia de 2% a 7% com custo equivalente entre US\$ 350 e US\$ 986 (ATABANI et al., 2011; CANADA/NRC, 2011).

Os esforços para reduzir o atrito do motor também são válidos para interferir no consumo energético, reduzindo o atrito no conjunto de pistão, no mancal e no deslocamento do virabrequim e na válvula de tração. A redução do atrito pode ser feita a partir da utilização de lubrificantes de baixa viscosidade, melhoria nos revestimentos da superfície e endurecimento e controle da superfície, sem, no entanto, afetar o desempenho geral do motor. A porcentagem de redução do consumo de combustível varia em torno de 0,5% a um custo de US\$ 3 por veículo (CANADA/NRC, 2011). Estima-se que o controle do aquecimento do motor, feito a partir do perfil da temperatura do cilindro, do design

da coroa do pistão, da área da superfície da porta de escape e por meio de bombas de resfriamento acionadas eletricamente, pode reduzir o consumo de combustível em até 3% com custo equivalente de € 100 (IEA, 2012b; CANADA/NRC, 2011).

Soma-se a isso a utilização do sistema *start-stop*, o qual desliga o motor automaticamente quando o veículo para e o reinicia instantaneamente quando o acelerador é acionado, reduzindo drasticamente as perdas oriundas da marcha lenta (ATABANI et al., 2011).

Outra forma de otimizar o funcionamento do motor pode ser realizada por meio da redução das perdas parasitas, relacionadas com os sistemas de cargas auxiliares que utilizam parte da energia fornecida pelo motor. Redução de 5% a 6% no consumo energético pode ser obtida a um custo de € 350 até € 440, apenas com a melhoria dos sistemas auxiliares. A partir da melhoria do ar-condicionado, pode-se obter um benefício de 2% a 4% no uso do combustível associado a um custo que varia de US\$ 100 a US\$ 200 por veículo (IEA, 2012b).

Os motores a ciclo diesel, por sua vez, são robustos e, em geral, mais eficientes que os veículos a ciclo Otto. Tal fato reforça a entrada desse tipo de tecnologia no mercado de veículos pesados. Apesar de ser uma tecnologia antiga, que data do fim do século XIX, sua eficiência evoluiu bastante ao longo do tempo e ainda tem potencial de evolução, como exibido no Figura 63. Basicamente, esse potencial está no uso de novas ligas metálicas na fabricação do sistema, no uso e reaproveitamento das perdas energéticas e no uso do motor apenas quando este se faz necessário, reduzindo o tempo em que se mantém ligado à espera do trabalho a ser realizado.

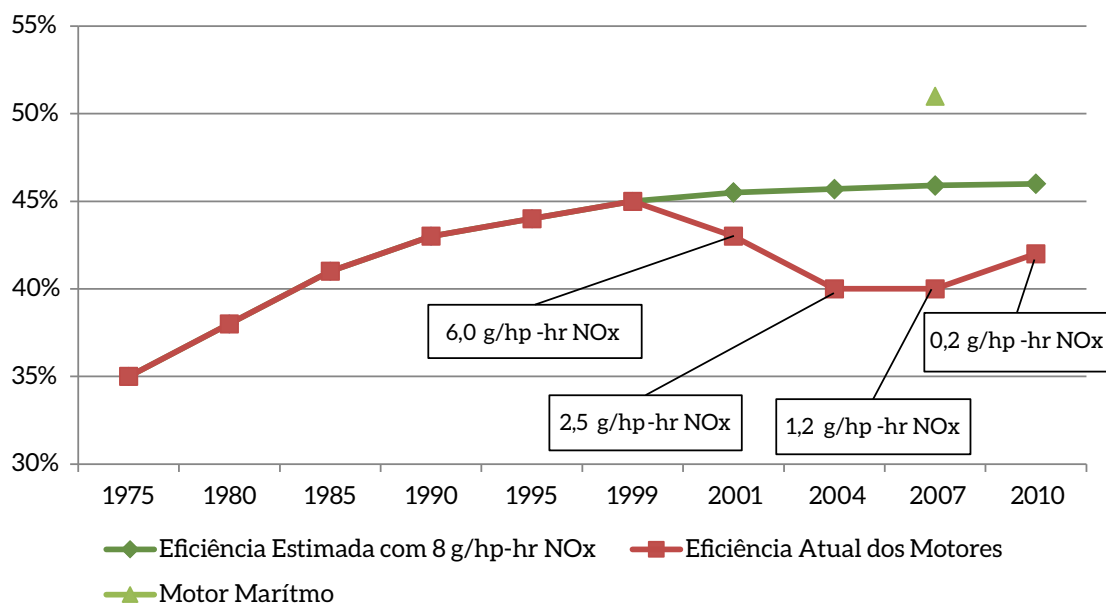


Figura 63 – Evolução da Eficiência de Motores Diesel e Influência da Regulação de NOx na Europa

Fonte: CANADA/NRC, 2010

O motor a ciclo diesel tem, em seu sistema de alimentação, dois circuitos básicos. O primeiro é o de ar e o segundo é o de combustível. Cada um é responsável por levar ar e combustível, respectivamente, até o cilindro, onde ocorrerá a mistura e a posterior explosão.

O primeiro potencial tecnológico para redução de consumo está no circuito de ar, o turbocompressor. O turbocompressor atua por meio da energia cinética dos gases exaustos, sendo constituído por dois rotores conectados e, uma vez que um deles é acionado pelo ar quente, o outro faz com que mais ar seja impulsionado para os cilindros. O efeito encontrado é o aumento da densidade do ar, uma vez que a admissão deste passa a ser feita em pressão superior à atmosférica e o consequente aumento da massa de ar admitido sem interferir no volume. O resultado é o aumento de potência e eficiência do motor.

O sistema de turbocompressor já é plenamente utilizado, mas ainda há como aumentar sua eficiência, mesmo sem alterar sua configuração. O programa de regulação japonês de eficiência estima ganho entre 0,3% e 0,5% no consumo específico, enquanto outras publicações estimam ganhos entre 1% e 2% (ICCT, 2009; KROMER; BOCKHOLT; JACKSON, 2009).

Em uma configuração usando dois turbocompressores e um *intercooler*, os ganhos estão entre 2% e 5% (CANADA/NRC, 2010). Tal configuração faz uso de dois turbocompressores em série, aproveitando melhor as relações de pressão obtidas no sistema. Tanto o ganho de eficiência do turbocompressor quanto o ganho pelo uso dos dois turbocompressores em série são tecnologias disponíveis no mercado. No caso dos EUA, boa parte dos veículos pesados já tem um desses sistemas. No caso brasileiro, ainda há grande penetrabilidade para a solução.

Seguindo a linha de aproveitamento energético dos gases exaustos, há a técnica *turbocompounding*. Trata-se de um sistema de conversão do excesso de energia dos gases exaustos que seriam considerados perdas. Há duas formas de fazê-lo: eletricamente ou mecanicamente. Na forma mecânica, todo o sistema do turbocompressor e motor é mantido e uma turbina adicional é inserida no sistema de exaustão. Essa turbina é conectada ao virabrequim, responsável por transformar toda a energia e direcioná-la aos eixos. O *turbocompound* mecânico usa ainda uma caixa de engrenagens para igualar as velocidades da turbina instalada e a do virabrequim. Variados ganhos de eficiência são atribuídos a esse uso, sendo o mais conservador entre 2,5% e 3% (ICCT, 2009; KROMER; BOCKHOLT; JACKSON, 2009). Há publicações que estimam ganhos ainda maiores, chegando a 4% (IEA, 2012b). O custo desse tipo de tecnologia está entre US\$ 3.000 e US\$ 8.000 (IEA, 2012b), e o mercado já está apto a fornecer esse tipo de solução.

O *turbocompound* elétrico segue a mesma lógica de funcionamento do mecânico. A diferença está na carga acionada. No caso elétrico, a turbina instalada aciona um gerador elétrico. Este pode atender diversas cargas auxiliares em um veículo pesado comum ou carregar uma bateria em um veículo híbrido. A atuação dessa tecnologia junto com a hibridização do veículo representa seu maior potencial. Estima-se que os ganhos gerados pelo *turbocompound* elétrico no consumo de combustível estão entre 3% e 5% (CANADA/NRC, 2010), podendo chegar a 7%, de acordo com IEA (2012b). O custo aproximado das soluções disponíveis no mercado fica entre US\$ 3.000 e US\$ 8.000 por veículo. A solução elétrica e a mecânica são excludentes devido à limitação da energia a ser aproveitada. Como a solução elétrica exige ainda um sistema auxiliar como baterias, motor elétrico e eletrificação de

todas as cargas auxiliares, que acarretam aumento do peso, tal solução tem sido mais utilizada em veículos híbridos, que já têm em seus sistemas os componentes mencionados.

No circuito de combustível, uma tecnologia de fácil implantação e bom potencial é a substituição do controle de válvulas, tornando-a um controle variável. A adição do sistema variável de controle de válvulas, além de facilitar a entrada de combustíveis alternativos, reduz o consumo de combustível em 1% (ICCT, 2009). Tanto a forma quanto a liberdade de controle das válvulas variam a cada fabricante, mas os resultados não divergem tanto.

Soma-se a isso o uso de sistemas automáticos de partida e parada disponíveis no mercado com faixas de preço que variam entre US\$ 2.500 e US\$ 3.750 (KROMER; BOCKHOLT; JACKSON, 2009). O potencial de eficiência varia de acordo com a classe do veículo. Para veículos de transporte de cargas médios, o potencial gira entre 2% e 4%. Para veículos pesados de transporte de passageiros, o potencial gira entre 3% no curto prazo e 6,25% (KROMER; BOCKHOLT; JACKSON, 2009) no longo prazo. O regime de funcionamento de partidas e paradas mais acentuadas em veículos de transportes de passageiros gera essa diferença de ganhos.

Na linha de aproveitamento e redução de consumo com sistemas auxiliares do motor, a eletrificação de parte ou da totalidade destes também gera redução no consumo de combustível. Como essas cargas auxiliares são atendidas pelo próprio motor de tração, acabam aumentando o consumo final de energia. Bomba de água, compressores, sistema hidráulico, ventiladores e sistema de condicionamento de ar são casos típicos em que o atendimento pode ser feito por auxiliar elétrico. Tais soluções têm potencial entre 2% e 4% (CANADA/NRC, 2010) e são mais efetivos em veículos de trânsito urbano e de viagens mais curtas. Um potencial maior é obtido quando a solução é feita em conjunto com veículos híbridos, chegando a valores entre 3% e 5% (ICCT, 2009). Há ainda a possibilidade de climatização da cabine e controle de temperatura do motor a partir de baterias auxiliares. Sistemas desse tipo têm autonomia entre oito e 12 horas (CANADA/NRC, 2010), sendo bastante úteis em veículos de transporte de cargas de longas viagens, que também fazem uso da climatização da cabine para o pernoite do motorista. O potencial da tecnologia está entre 5% e 9% (CANADA/NRC, 2010), e seu custo está entre US\$ 3.000 e US\$ 8.000.

Há, ainda, a opção de centrais de apoio aos veículos que fazem longos trajetos. A ideia desse sistema é servir como base de apoio no momento de parada do veículo para descanso do motorista. Nesse momento, o sistema elétrico do veículo é ligado a uma estação externa que supre esse papel. Esse viés tecnológico é mais difícil de implantar, pois depende de infraestrutura própria para o recebimento do veículo. Seu custo estimado gira em torno de US\$ 100, sem contabilizar os custos de infraestrutura para os centros de apoio aos veículos e motoristas. Seu potencial de redução está entre 5% e 9%.

Como dito, o uso de materiais e ligas metálicas mais leves ou mais resistentes também gera ganhos à eficiência do sistema, não só pela redução de peso, discutida no item 3.1.1.3, mas também pela possibilidade de melhorias que podem ser geradas nos ciclos de combustão do motor. Materiais melhorados podem ser utilizados para aumento da pressão nos cilindros (CANADA/NRC, 2010), por exemplo. Em linhas gerais, parâmetros de projeto como taxa de compressão e expansão, forma da câmara de combustão, parâmetros da injeção de combustível (pressão, tempo, pulverização) e a mistura de ar e combustível influenciam diretamente o consumo e dependem de materiais e projetos avançados.

Com sistemas avançados de injeção de combustível a alta pressão, há ganhos energéticos entre 1% e 4%. Considerando todo o potencial de avanço possível, o ganho seria entre 9,4% e 12% para veículos de transporte urbano e regional e entre 4,6% e 17% para veículos de longo transporte. Seus custos são próximos de € 3.730 e € 10.415, respectivamente.

Por fim, ganhos com a redução de atrito das partes móveis do motor também podem ser gerados. Essa solução, entretanto, é bastante delicada, pois não pode influenciar a durabilidade e a capacidade da peça alterada. Ganhos entre 1% e 1,5% podem ser gerados além dos ganhos sobre o uso de lubrificantes eficientes.

É importante salientar ainda que a perspectiva de controle de emissões de NOx influencia negativamente a eficiência dos motores e esse *trade-off* sempre deve ser analisado. A Figura 63, por exemplo, mostra a evolução da eficiência de motores diesel para transporte rodoviário em comparação à evolução da eficiência em motores marítimos, que não têm restrição quanto a emissões de NOx. Claro que há uma série de outros fatores que influenciam essa questão comparativa, como a baixa rotação e velocidades constantes dos motores marítimos, por exemplo, mas essa relação por si só é um forte indicativo. Fabricantes estimam, dadas as características operacionais de motores marítimos, que a eficiência de motores diesel para transporte rodoviários seria cerca de 10% menor que a de motores marítimos (CANADA/NRC, 2010), como mostrado na Figura 63.

3.1.1.5 TRANSMISSÃO E SISTEMA DE TRAÇÃO

A transmissão do veículo é responsável por converter a força do motor em movimento, podendo ser do tipo mecânica/manual, automatizada, automática, continuamente variável ou automatizada de dupla embreagem. A tecnologia de transmissão é capaz de otimizar a utilização do combustível movendo a operação do motor para regiões mais eficientes ou por meio da redução contínua das perdas mecânicas que ocorrem dentro das transmissões (CANADA/NRC, 2011). Sendo assim, a partir da redução do atrito no sistema de transmissão, é possível reduzir o consumo de combustível de 1% a 2% a um custo equivalente de € 50 (IEA, 2012b).

Tendo em vista o número de relação de velocidade entre motor e roda, um veículo com transmissão automática com cinco velocidades possibilita redução no consumo de 2% a 3% a um custo que varia entre US\$ 70 e US\$ 200. Portanto, a transmissão automática com seis, sete ou oito velocidades, relacionando o aumento do número de engrenagens com a possibilidade de operar o motor mais próximo ao seu ponto de eficiência, permite redução de 3% a 8% a um custo de até US\$ 422. A transmissão continuamente variável, que utiliza uma correia de aço e duas polias capazes de alterar seu diâmetro, promove variação contínua de velocidades, tornando infinitas as marchas e possibilitando redução de até 7% no consumo de combustível a um custo incremental associado que pode variar entre US\$ 140 e US\$ 380 por veículo (ATABANI et al., 2011; NRC, 2011).

Além disso, pode-se alcançar uma melhoria de 5% a 6% no gasto energético do veículo a um custo em torno de US\$ 700 a partir da implementação da transmissão com embreagem dupla, que permite a troca de marchas do veículo, com reduzidas perdas de giro do motor, melhorando seu

desempenho (IEA, 2012b). As tecnologias que melhoram a performance da transmissão, dada a estreita ligação entre os efeitos das tecnologias aplicadas ao motor no intuito de reduzir o consumo energético, não podem ser associadas a mudanças significativas, como alteração da configuração de válvulas ou desativação dos cilindros (CANADA/NRC, 2011).

3.1.1.6 HIBRIDIZAÇÃO

A hibridização de um veículo é caracterizada pela presença de dois motores, um a combustão interna e outro elétrico. A configuração desses dois motores pode ser classificada como paralelo, série ou a junção dos dois tipos. Na configuração paralelo, ambos os motores têm conexão com a transmissão do veículo, porém o motor a combustão interna é o principal agente propulsor do veículo, e o motor elétrico, uma complementação para melhor desempenho. Já na configuração série, apenas o motor elétrico está conectado ao sistema de transmissão, de modo que o motor a combustão interna está presente apenas para movimentar o gerador responsável por gerar a energia necessária para a locomoção do veículo e recarregar as baterias a bordo. Quando a junção das duas configurações ocorre, tem-se o veículo híbrido série-paralelo, modelo que maximiza os benefícios de ambos. Nesse arranjo, utiliza-se um gerador capaz de fornecer energia mecânica para as rodas do veículo e, paralelamente, gerar eletricidade (CANADA/NRC, 2011).

O veículo híbrido permite utilização mais eficiente do motor a combustão interna, assim como a recuperação de energia durante a frenagem e a eliminação das perdas em marcha lenta (IEA, 2012b). A hibridização de um automóvel com ignição por centelha pode trazer redução no consumo de combustível de até 37% a um custo de US\$ 2.630 por veículo. E a hibridização de um automóvel com ignição por compressão pode reduzir o consumo em até 30% a um custo de US\$ 2.070 por veículo (IEA, 2009).

Cabe destacar que é possível associar outras tecnologias incrementais para os veículos juntamente com a hibridização, de modo a ampliar a economia energética do veículo. A partir dessa associação, chega-se a uma economia de até 63%, a um custo de € 6.270 por veículo, para automóveis movidos a gasolina, e de até 52%, a um custo equivalente de € 6.125 por veículo, para automóveis movidos a diesel (IEA, 2012b).

Ampliando o conceito de hibridização, há os carros elétricos híbridos *plug-in*, que podem ser recarregados por meio da alimentação proveniente da rede elétrica, além do motor a combustão e frenagem regenerativa. O veículo elétrico híbrido *plug-in* torna possível uma economia no consumo de combustível de até 49% associada a um custo de US\$ 4.210 até US\$ 6.710 por veículo movido a gasolina, de modo que, combinada com o uso de injeção direta de gasolina e o uso de válvula de sustentação variável temporizada, a redução pode chegar a até 54% de economia a um custo entre US\$ 6.990 e US\$ 5.130. Para veículos elétricos híbridos *plug-in* movidos a diesel, alcança-se melhora no consumo de 41% até 46% a um custo entre US\$ 4.220 e US\$ 6.720 por veículo. Podem ser associados nesses veículos um motor diesel avançado, que permitiria uma economia entre 50% e 55% a um custo de US\$ 5.940 até US\$ 8.290 (IEA, 2009).

3.1.1.7 SISTEMAS INTELIGENTES

Os sistemas de tecnologia inteligente embarcada já são plenamente utilizados em veículos leves. Apesar de o foco principal ser a segurança, conceitualmente, as ações de eficiência energética são bem parecidas entre veículos leves e pesados. Os sistemas embarcados podem ser passivos, de modo que as informações são passadas ao condutor para que este aprimore sua forma de direção, ou ativos, de modo que a atuação é feita diretamente, independentemente da vontade do condutor, o que evita erros de direção.

Dentre os sistemas ativos, alguns se destacam. Nos sistemas adaptativos, a condução do veículo se torna automática a partir do momento em que outro veículo se posta à frente. Sensores são alocados no veículo de forma que é mantida uma distância segura do veículo à frente. Nesse momento, dá-se início ao controle automático do veículo, que passa a ter regimes de aceleração e desaceleração mais suaves, aproximando-se de velocidades constantes, o que gera maior eficiência, de até 10% (CANADA/NRC, 2010), além de ganhos em segurança. Seu custo está entre US\$ 1.100 e US\$ 3.000, e seu uso, além de disponível no mercado, está centrado principalmente em viagens mais longas, fora dos grandes centros urbanos, onde se pode manter velocidade mais constante.

Há ainda ganhos mais extremos que consideram a topografia local e fazem controle da aceleração e da velocidade ideal para a direção em vias mais íngremes. Nomeado de controle preditivo, esse sistema tem potencial de 1% a 3% (KROMER; BOCKHOLT; JACKSON, 2009), mas sua penetrabilidade no mercado é reduzida dado o seu uso ser bem específico. Em veículos híbridos, entretanto, o sistema preditivo tem penetrabilidade maior. Considerando a grande diferença entre os regimes operacionais de veículos híbridos em áreas urbanas e interurbanas, o sistema preditivo localizado por GPS aumenta a economia no uso desses veículos. Nesse caso, o potencial de ganho de eficiência está entre 3% e 9% (CANADA/NRC, 2010) e seu custo, similar ao do sistema preditivo tradicional, entre US\$ 860 e US\$ 1.560, dependendo do tipo de veículo (CANADA/NRC, 2010).

No limite do estado da arte está o controle de comboio. Nesse tipo de sistema, há um conceito com mesma base do controle adaptativo, porém mais amplo e extenso. Nesse sistema, um único veículo é conduzido, enquanto demais veículos que fazem o mesmo trajeto e se deslocam em comboio o seguem, mantendo entre si um distanciamento seguro. Como os veículos de condução automática têm regimes de aceleração e desaceleração muito mais suaves, apresentam ganho de eficiência em relação ao primeiro veículo do comboio. O ganho de eficiência fica entre 10% e 17%, apesar da baixa penetrabilidade, devido a seu uso específico.

Com a evolução do uso e precisão do GPS, cada vez mais sistemas georreferenciados para o transporte são aplicáveis. Como ganho tecnológico passivo importante, deve-se destacar a possível gestão de rotas dinâmicas atualmente. Nessa forma de gestão de rotas, o condutor do veículo passa a poder fazer ajustes em suas rotas, de acordo com informações que recebe de seu sistema de tráfego, acidentes e condições adversas no caminho previamente traçado. Dado o atual avanço de celulares e *smartphones*, essa tecnologia torna-se ainda mais acessível com ganhos de 1% ao custo entre US\$ 400 e US\$ 800.

3.1.1.8 SÍNTESE

A Tabela 38, a Tabela 39 e a Tabela 40 apresentam o resumo dos ganhos de eficiência e os custos associados às tecnologias incrementais para os veículos automotivos: veículos leves, caminhões e ônibus.

Tabela 38 – Ganhos de Eficiência e Custos das Tecnologias Incrementais nos Veículos Leves

Macroações	Tecnologias	Faixa de Ganho (%)	Faixa de Custo (US\$)
Aerodinâmica	Melhoria na aerodinâmica e redução do arrasto	1 – 5	50 – 200
Redução de massa	Substituição por materiais mais leves	1 – 15	50 – 3.000
Pneus e rodas	Redução da resistência de rolamento dos pneus	1 – 5	10 – 80
Transmissão e sistema de tração	Redução do atrito no sistema de transmissão e tração, transmissão continuamente variável e continuamente variável avançada, automática, dupla embreagem, aumento do número de relação de velocidade entre motor e roda	1 – 10	30 – 1.000
Motor	Redução do atrito no motor, redução acentuada no tamanho e peso do motor associado a turboalimentação, utilização de lubrificantes com baixo atrito, controle térmico, melhoria nos ciclos da termodinâmica, adequação do número e funcionalidade das válvulas, desativação dos cilindros, injeção direta de gasolina, conversão para diesel e diesel avançado, melhoria no combustível, sistema <i>start-stop</i> e melhoria nos acessórios do motor	1 – 40	1.700 – 6.000
Hibridização	Micro-hibridização, hibridização completa, hibridização <i>plug-in</i> e gerador de arranque integrado	2 – 50	200 – 9.000
Cargas auxiliares	Melhoria dos sistemas auxiliares e acessórios, aumento da eficiência do ar-condicionado	1 – 10	50 – 600

Fonte: ATABANI et al., 2011; IEA, 2007, 2009, 2011a, 2012b; NAS, 2009

Tabela 39 – Ganhos de Eficiência e Custos das Tecnologias Incrementais nos Caminhões

Macroações	Tecnologias	Faixa de Ganho (%)	Faixa de Custo (US\$)
Aerodinâmica	Entrada de ar frontal, carenagem na parte superior da cabine, borda lateral das cabines, carenagem frontal e lateral no semirreboque/ <i>trailer</i> , basculante com aerodinâmica, semirreboque com telhado inclinado, redução de altura do veículo, redução de carga de vento nos pneus	1 – 5	3.000 – 4.000
Redução de massa	Substituição por materiais mais leves	1 – 5	2.000 – 5.000
Pneus e rodas	Pneu de base larga, redução da resistência de rolamento dos pneus	1 – 5	–
Motor	Turbocompressor, <i>turbocompounding</i> , <i>turbocompounding</i> elétrico, sistema variável de controle de válvulas, eletrificação de cargas auxiliares, melhorias nos ciclos de combustão, redução de atrito nas partes móveis	1 – 20	3.000 – 10.500
Redução de tempo ocioso	Sistemas automáticos de partida e parada, baterias auxiliares, sistema auxiliar de energia elétrica e centrais de apoio	2 – 10	3.000 – 8.000
Sistemas inteligentes	Sistema adaptativo, sistema preditivo, sistema de comboio e sistemas para otimização de rotas	1 – 10	400 – 800

Fonte: ICCT, 2009; IEA, 2012b; KROMER; BOCKHOLT; JACKSON, 2009; LIIMATAINEN et al., 2014; CANADA/NRC, 2011

Tabela 40 – Ganhos de Eficiência e Custos das Tecnologias Incrementais nos Ônibus

Macroações	Tecnologias	Faixa de Ganho (%)	Faixa de Custo (US\$)
Aerodinâmica	Entrada de ar frontal, carenagem na parte superior da cabine, redução da altura do veículo, redução da carga de vento nos pneus	1 – 5	–
Redução de massa	Substituição por materiais mais leves	1 – 5	2.000 – 5.000
Pneus e rodas	Pneu de base larga, redução da resistência de rolamento dos pneus	1 – 5	–
Motor	Turbocompressor, <i>turbocompounding</i> , <i>turbocompounding</i> elétrico, sistema variável de controle de válvulas, eletrificação de cargas auxiliares, melhorias nos ciclos de combustão, redução de atrito nas partes móveis	1 – 15	3.000 – 8.000
Redução de tempo ocioso	Sistemas automáticos de partida e parada, baterias auxiliares, sistema auxiliar de energia elétrica e centrais de apoio	2 – 10	3.000 – 8.000
Sistemas inteligentes	Sistema adaptativo, sistema preditivo	1 – 10	800 – 3.000

Fonte: ICCT, 2009; IEA, 2012b; KROMER; BOCKHOLT; JACKSON, 2009; LIIMATAINEN et al., 2014; CANADA/NRC, 2011

3.1.2 EMBARCAÇÕES

De modo geral, o transporte hidroviário tem dois tipos de ganhos em eficiência energética no aspecto tecnológico e, conseqüentemente, na redução de emissões de GEE, que são os referentes às embarcações existentes e aqueles relacionados aos novos veículos marítimos e fluviais a serem incorporados na matriz do transporte hidroviário brasileiro.

Nas embarcações existentes, os ganhos energéticos na forma de redução de consumo de combustível marítimo (óleo combustível e diesel) têm algumas limitações no âmbito do projeto construtivo, como as propriedades físicas dos materiais do casco, proa e popa que levam a determinadas resistências hidro e aerodinâmicas, e que necessitariam de grandes intervenções ou paradas em estaleiros para reformas. No entanto, há outros tipos de investimentos mais fáceis de serem aplicados para melhoramento da performance energética de um veículo hidroviário, como a substituição por um acionamento mais eficiente no sistema de propulsão e ações com foco na concepção energética inerente ao seu interior, seja na eficiência energética das cargas internas ou pelo reaproveitamento energético dos gases exaustos para implementação de cogeração.

Diferentemente da dificuldade natural que existe nas embarcações existentes, pois reformas com viés energético podem exigir colocá-las inoperantes por algum tempo, o que é uma escolha difícil para o proprietário, as novas embarcações podem ser construídas com um conceito de maximização no aproveitamento dos recursos energéticos. Independentemente das possíveis dificuldades técnicas e econômicas de implementação de medidas para ganhos energéticos nas embarcações antigas, são poucos os tipos de ações com esse fim que não são aplicáveis (IMO, 2009; VERGARA; MCKESSON; WALCZAK, 2012).

Como macroações de redução de consumo energético com tecnologias incrementais, pode-se dividi-las em três grupos: redução das resistências hidro e aerodinâmica, otimização do sistema de propulsão e melhoria da concepção energética da embarcação (VERGARA; MCKESSON; WALCZAK, 2012).

Para indicação dos custos das tecnologias a serem abordadas, há necessidade de identificação do perfil atual da frota brasileira relativa à navegação interior e marítima, pois os custos em eficiência energética abrangidos na literatura existente são por tipo de embarcação e faixas de capacidade em TPB. Desse modo, a Figura 64 contempla os portes médios em TPB da frota nacional de oito tipos de embarcação, como referência para a análise.

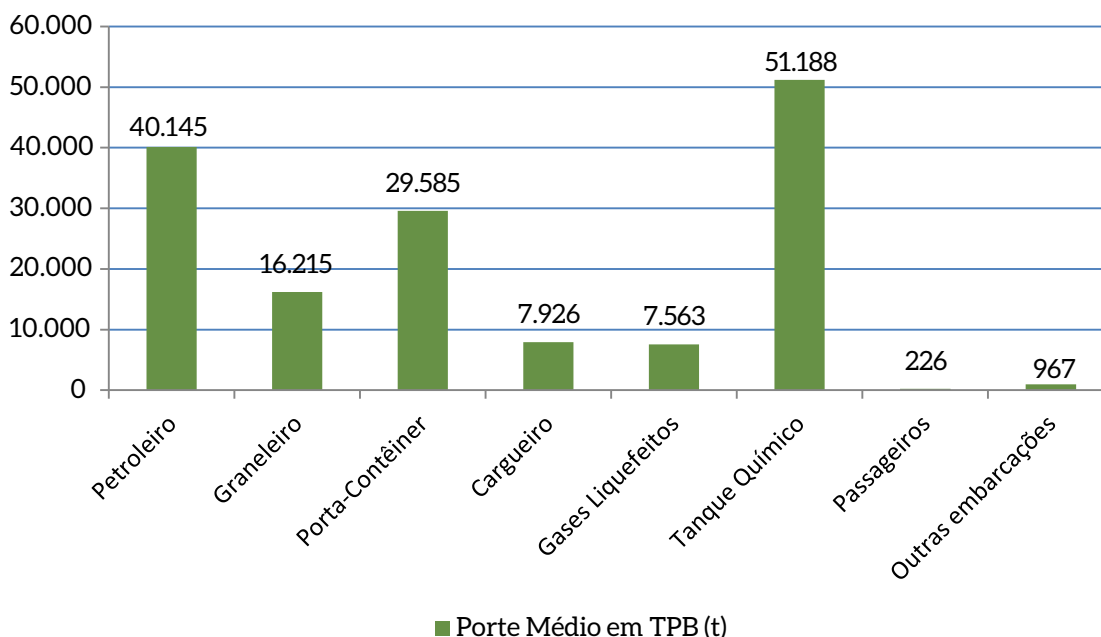


Figura 64 – Porte Médio por Tipo de Embarcação da Cabotagem e Navegação Interior

Fonte: BRASIL/ANTAQ, 2011a, 2013b

3.1.2.1 HIDRO E AERODINÂMICA

As resistências hidro e aerodinâmica de uma embarcação podem ser minimizadas por meio da limpeza do casco, seja usando equipamentos mecânicos de escovação automatizados ou mesmo por mergulhadores, e têm o objetivo de remover os resíduos biológicos e, por consequência, reduzir a resistência friccional do veículo hidroviário (ICCT, 2011b). Aplicável a todos os tipos de embarcações, a limpeza do casco pode representar redução de consumo de combustível entre 1% e 10% com custo entre US\$ 115 e US\$ 148 por metro do LOA (comprimento de fora a fora da embarcação) (FABER et al., 2010). Tendo em vista os diversos tipos construtivos existentes, se considerado um LOA de 100 metros para uma embarcação típica de passageiros e 200 metros para os demais tipos, os custos da limpeza do casco seriam respectivamente de US\$ 11.500 a US\$ 14.800 e US\$ 23.000 a US\$ 29.600, caso realizada uma vez por ano.

Outra maneira de obter ganhos nesse quesito, entre 0,5% e 5%, seria utilizar pintura especial para propiciar um revestimento no casco que diminui o acúmulo de organismos aquáticos (ICCT, 2011b). Dentre alguns tipos de pintura com essa finalidade, o revestimento pode ser do tipo autolimpante para reduzir a incrustação orgânica e de material à base de silicone, que evita o crescimento desses organismos (KOLIEB; SAVITZ, 2010). Na Tabela 41 são apresentadas referências de variação de custo dessa pintura especial para os diferentes tipos de embarcação.

Tabela 41 – Custos das Diferentes Pinturas Especiais no Casco

Tipo de Embarcação	Custo Mínimo (US\$)	Custo Máximo (US\$)
Petroleiro	35.750	220.480
Graneleiro	26.330	162.370
Porta-contêiner	27.560	169.950
Cargueiro	12.950	79.850
Gases liquefeitos	86.190	531.580
Tanque químico	36.360	224.260
Passageiro	3.250	20.010
Outras embarcações	12.000	74.000

Fonte: FABER et al., 2010

No tocante a um sistema específico para diminuir a resistência hidrodinâmica para redução da potência exigida pelo sistema de propulsão, a solução é a injeção de ar comprimido ao longo do casco inferior por meio de um sistema de compressores e válvulas automatizadas (ICCT, 2011b), conforme pode ser observado na Tabela 42. Porém, além de não ser aplicável a todas as embarcações, o ganho de eficiência por esse tipo de sistema pode ser prejudicado pelo mar ou rio agitado (VERGARA; MCKESSON; WALCZAK, 2012).

Tabela 42 – Ganhos de Eficiência e Custos do Sistema de Injeção de Ar no Casco

Tipo de Embarcação	Faixa de Ganho (%)	Custo Mínimo (US\$)	Custo Máximo (US\$)
Petroleiro	5 – 15	824.850	1.237.280
Graneleiro	5 – 15	737.400	1.106.100
Porta-contêiner	2,5 – 9,0	1.015.250	1.522.870
Gases liquefeitos	5 – 15	2.100.000	3.150.000

Fonte: FABER et al., 2010

No aspecto construtivo da embarcação, para reduzir parte da resistência hidrodinâmica provocada pelas perturbações na água oriundas das aberturas no casco, a opção é a instalação de rebordos ou grades (Figura 65) que proporcionam, por meio dos dispêndios apresentados na Tabela 43, redução de consumo energético entre 1% e 5%.

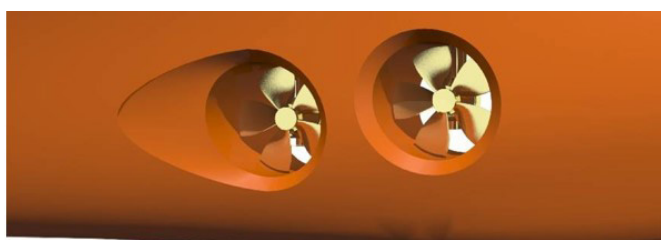


Figura 65 – Instalação de Rebordos

Fonte: WARTSILA, 2010

Tabela 43 – Custos da Instalação de Rebordos ou Grades

Tipo de Embarcação	Custo Mínimo (US\$)	Custo Máximo (US\$)
Petroleiro	51.430	56.840
Graneleiro	26.250	29.010
Porta-contêiner	75.780	83.760
Cargueiro	10.950	12.110
Gases liquefeitos	144.630	159.860
Tanque químico	40.560	44.830
Passageiro	3.180	3.510
Outras embarcações	34.220	37.820

Fonte: FABER et al., 2010

Uma solução de baixo custo (Tabela 44) e que apresenta resultados de redução de consumo de combustível na faixa de 0,5% a 3% é a instalação de um sistema de piloto automático adaptativo. Tal sistema proporciona a otimização da posição do leme, considerando o vento e a correnteza para guiar na rota em que há menor resistência hidro e aerodinâmica.

Tabela 44 – Custos da Instalação de Piloto Automático

Tipo de Embarcação	Custo Mínimo (US\$)	Custo Máximo (US\$)
Petroleiro	21.110	23.330
Graneleiro	15.310	16.920
Porta-contêiner	44.200	48.860
Cargueiro	6.390	7.060
Gases liquefeitos	33.090	36.570
Tanque químico	23.660	26.150
Passageiro	1.850	2.050
Outras embarcações	19.960	22.060

Fonte: FABER et al., 2010

3.1.2.2 SISTEMA DE PROPULSÃO

A hélice é um dos principais componentes de uma embarcação e, por isso, seu estado de conservação, tipo de material e controle impactam significativamente o consumo de combustível, pois quanto menor a turbulência gerada, maior a eficiência do sistema de propulsão. Desse modo, caso a hélice esteja danificada ou arranhada devido à operação normal da embarcação, sua substituição e a realização de controle das pás da hélice podem reduzir as perdas de energia.

Entretanto, há diferentes tipos de solução para ganho de rendimento pela hélice. Entre as tecnologias disponíveis, tanto a implementação de uma hélice com forma de lâmina na ponta, *tip winglets* (Figura 66), quanto a inserção de *nozzles* (Figura 67), que é uma seção em forma de anel, geram aumento da propulsão e, por consequência, redução no consumo de combustível entre 0,5% e 4,5%, cujos custos mínimo e máximo estão indicados na Tabela 45.

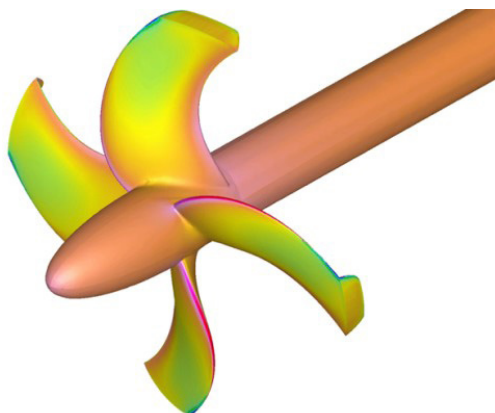


Figura 66 – Hélice do Tipo *Tip Winglets*

Fonte: WARTSILA, 2010

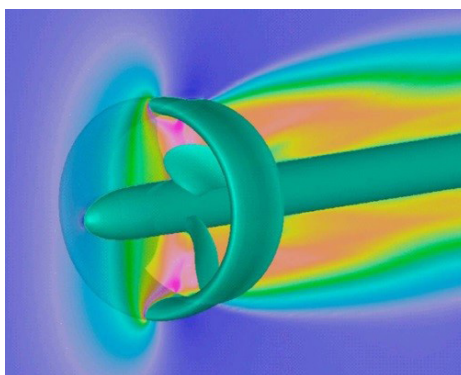


Figura 67 – Hélice do Tipo *Nozzles*

Fonte: WARTSILA, 2010

Tabela 45 – Custos das Tecnologias de Hélice *Tip Winglets* ou *Nozzles*

Tipo de Embarcação	Custo Mínimo (US\$)	Custo Máximo (US\$)
Petroleiro	603.210	666.700
Gases liquefeitos	2.410.520	2.664.260
Tanque químico	676.020	747.180
Outras embarcações	212.680	235.070

Fonte: FABER et al., 2010

Outro tipo de hélice é conhecido como *boss cap with fins* (Figura 68). Esse tipo de hélice tem uma quantidade de aletas igual ao número de pás da hélice e possibilita recuperação de energia entre 1% e 3% devido ao fluxo de rotação. Além de ser uma tecnologia estendida a outros tipos de embarcações, ao contrário das opções *tip winglets* e *nozzles*, tem custos bem menores, conforme se pode observar na Tabela 46. O motivo é que esse tipo de *retrofit* não exige modificação da hélice, e o acoplamento desse dispositivo aproveita a furação existente, o que torna a instalação mais fácil (FABER et al., 2010; HANSEN; PEREN; NOJIRI, 2011; ICCT, 2011b).

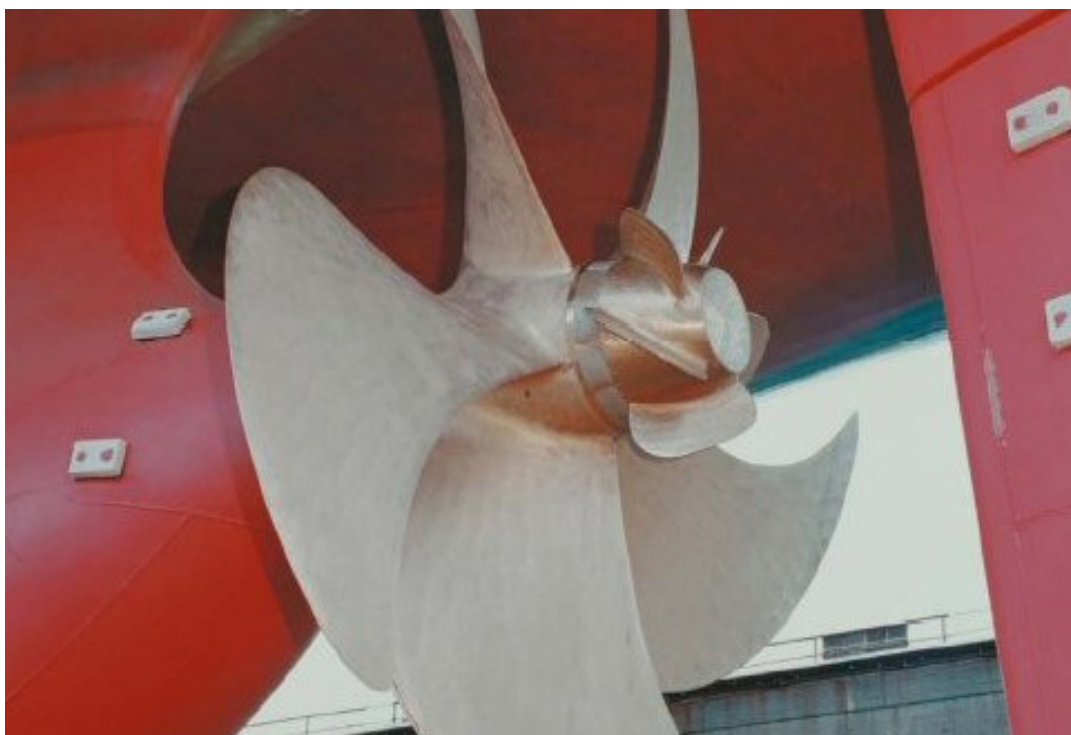


Figura 68 – Hélice do Tipo *Boss Cap With Fins*

Fonte: HANSEN; PEREN; NOJIRI, 2011

Tabela 46 – Custos da Tecnologia de Hélice *Boss Cap With Fins*

Tipo de Embarcação	Custo Mínimo (US\$)	Custo Máximo (US\$)
Petroleiro	56.060	68.520
Graneleiro	48.330	59.070
Porta-contêiner	128.270	156.780
Cargueiro	29.730	36.330
Gases liquefeitos	144.920	177.130
Tanque químico	62.120	75.920
Passageiro	19.110	23.360
Outras embarcações	40.110	49.020

Fonte: FABER et al., 2010

Como mais uma solução para elevar a eficiência energética entre 2% a 6%, a Figura 69 demonstra a integração de projeto do propulsor com o leme objetivando reduzir o arrasto, que se torna ainda maior no leme na ocasião de potências parciais (FABER et al., 2010; WARTSILA, 2010). Como essa solução envolve intervenção maior que as anteriores, os custos também são superiores, conforme pode ser observado na Tabela 47.

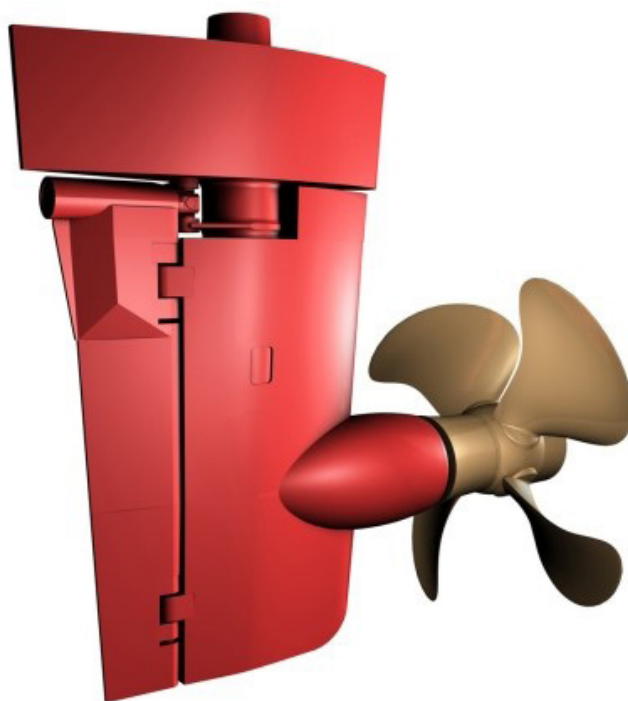


Figura 69 – Sistema de Propulsão Integrado ao Leme

Fonte: WARTSILA, 2010

Tabela 47 – Custos do Propulsor Integrado ao Leme

Tipo de Embarcação	Custo Mínimo (US\$)	Custo Máximo (US\$)
Petroleiro	965.130	1.066.720
Graneleiro	699.990	773.680
Porta-contêiner	2.020.760	2.233.470
Cargueiro	292.080	322.830
Gases liquefeitos	266.510	294.560
Tanque químico	1.081.630	1.195.490
Outras embarcações	235.710	260.530

Fonte: FABER et al., 2010

Entretanto, cabe destacar que a redução do consumo energético está limitada a 6%, mesmo que haja a realização das três ações acima indicadas (ICCT, 2011b). Já as ações referentes ao motor tipo diesel de uma embarcação, que propiciam maior eficiência energética, respondem por outra parcela que, no caso, por exemplo, da tecnologia *common rail*, faz com que a combustão seja otimizada em toda a faixa de carga do motor. A instalação desse sistema, cujos custos são apresentados na Tabela 48, pode gerar ganho de eficiência entre 0,1% e 0,5% (FABER et al., 2010; ICCT, 2011b).

Tabela 48 – Custos da Tecnologia *Common Rail*

Tipo de Embarcação	Custo Mínimo (US\$)	Custo Máximo (US\$)
Petroleiro	36.190	40.000
Graneleiro	26.250	29.010
Porta-contêiner	75.780	83.760
Cargueiro	10.950	12.110
Gases liquefeitos	144.630	159.860
Tanque químico	40.560	44.830
Passageiro	3.180	3.510
Outras embarcações	22.180	24.520

Fonte: FABER et al., 2010

Excludente à instalação da tecnologia *common rail*, outra forma, no motor, de se obter ganho de eficiência energética entre 0,1% e 0,8% é o sistema de ajuste da injeção, que proporciona melhor controle em cargas parciais, ocasionando regulação de tempo adequada para a injeção do combustível no motor (FABER et al., 2010; ICCT, 2011b; WARTSILA, 2010), com custos demonstrados na Tabela 49.

Tabela 49 – Custos do Sistema de Ajuste da Injeção do Motor

Tipo de Embarcação	Custo Mínimo (US\$)	Custo Máximo (US\$)
Petroleiro	108.577	120.006
Graneleiro	78.749	87.039
Porta-contêiner	227.335	251.226
Cargueiro	44.391	49.064
Gases liquefeitos	433.893	479.566
Tanque químico	121.684	134.492
Outras embarcações	102.649	113.454

Fonte: FABER et al., 2010

Quanto à oportunidade de aumento da eficiência energética do sistema propulsor por meio da manutenção, a limpeza e o polimento da hélice podem ser ferramentas importantes. Caso a retirada dos materiais orgânicos e a redução da rugosidade sejam feitas sempre que necessário, a partir do monitoramento do desempenho da hélice, há potencial ganho na faixa de 2% a 8% para todas as embarcações (FABER et al., 2010). Os custos de monitoramento da eficiência da hélice são apresentados na Tabela 50. Caso considerada uma embarcação provida de quatro propulsores e uma periodicidade semestral de polimento da hélice, os custos anuais seriam de US\$ 24.000 a US\$ 40.000, em adição aos custos indicados na Tabela 50 (FABER et al., 2010).

Tabela 50 – Custos do Sistema de Monitoramento da Eficiência da Hélice

Tipo de Embarcação	Custo Mínimo (US\$)	Custo Máximo (US\$)
Petroleiro	27.140	30.000
Graneleiro	19.690	21.760
Porta-contêiner	56.830	62.820
Cargueiro	8.210	9.080
Gases liquefeitos	108.470	119.890
Tanque químico	30.420	33.620
Passageiro	2.380	2.630
Outras embarcações	16.640	18.390

Fonte: FABER et al., 2010

Além das ações de eficiência energética no âmbito do sistema de propulsão abordadas, outra oportunidade de grande relevância, com benefícios operacionais e energéticos, é a substituição do sistema de propulsão diesel-mecânica por propulsão diesel-elétrica. O uso de propulsor azimuthal, que consiste no motor acoplado diretamente a uma hélice de passo fixo, pode maximizar esse ganho, juntamente com o controle da velocidade do motor elétrico (TRINDADE, 2012).

3.1.2.3 MELHORIA DA CONCEPÇÃO ENERGÉTICA

No aspecto de um melhor projeto energético, o reaproveitamento da energia térmica proveniente dos gases exaustos dos motores das embarcações é considerado ação de grande valia para navios de grande porte. Como essas embarcações consomem muita energia elétrica, a implementação de cogeração para produção de energia elétrica por meio da recuperação do calor, com o objetivo de suprir motores auxiliares e demais cargas, pode ocasionar ganho de eficiência entre 6% e 8% (FABER et al., 2010), resultando em custos de acordo com a Tabela 51. No entanto, para o caso de embarcações de grande porte existentes, a opção de um *retrofit* com esse fim nem sempre é viável comercialmente (KOLIEB; SAVITZ, 2010).

Tabela 51 – Custos do Sistema de Cogeração de Energia

Tipo de Embarcação	Custo Mínimo (US\$)	Custo Máximo (US\$)
Petroleiro	3.336.920	3.688.180
Porta-contêiner	3.161.560	3.494.360
Gases liquefeitos	5.732.060	6.335.430
Outras embarcações	2.117.800	2.340.730

Fonte: FABER et al., 2010

Para redução do consumo de energia elétrica a bordo, existem algumas oportunidades, dentre as quais destaca-se o controle de velocidade dos motores elétricos por meio de conversores de frequência cujas cargas acionadas são bombas e ventiladores que podem garantir ganho de eficiência entre 0,2% e 1,0% (FABER et al., 2010), com custos apresentados na Tabela 52.

Tabela 52 – Custos do Controle de Velocidade de Bombas e Ventiladores

Tipo de Embarcação	Custo Mínimo (US\$)	Custo Máximo (US\$)
Petroleiro	144.770	160.010
Graneleiro	105.000	116.050
Porta-contêiner	303.110	335.020
Cargueiro	43.810	48.420
Gases liquefeitos	578.520	639.420
Tanque químico	162.240	179.320
Passageiro	12.700	14.040
Outras embarcações	136.870	151.270

Fonte: FABER et al., 2010

Outra opção de redução de consumo de energia elétrica se refere ao projeto de iluminação, pois, com luminárias e lâmpadas mais eficientes (tecnologia LED, por exemplo), pode-se alcançar ganho de eficiência entre 0,1% e 0,8%, com custos entre US\$ 9.530 e US\$ 10.530 para embarcações de passageiros e entre US\$ 66.540 a US\$ 275.070 para os demais tipos (FABER et al., 2010; ICCT, 2011b).

3.1.2.4 SÍNTESE

A Tabela 53 apresenta as referências de custos e redução de consumo de energia das tecnologias disponíveis para uma embarcação típica nacional. Essa tabela foi elaborada relacionando ganhos mínimos e máximos de eficiência energética de cada tipo de embarcação com seu *share* de capacidade em TPB, tendo em vista que o consumo de combustível está associado à carga transportada. No entanto, o estabelecimento dos custos mínimos e máximos globais de implementação das macroações de tecnologias incrementais considerou as proporções do quantitativo atual de cada tipo de embarcação no Brasil (petroleiro, porta-contêiner, passageiro etc.), pois o investimento ocorreria em cada embarcação. Cabe destacar que nem todas as oportunidades de eficiência energética são aplicáveis a todos os tipos de embarcação, como já exposto, mas, para representar uma embarcação típica e somente as três macroações (redução das resistências hidro e aerodinâmica, otimização do sistema de propulsão e melhoria da concepção energética), é correto afirmar que a aplicabilidade para a frota brasileira é de 100%, isto é, todas as macroações, de alguma forma, podem ser executadas em todas as embarcações do país.

Tabela 53 – Ganhos de Eficiência e Custos das Tecnologias Incrementais nas Embarcações

Macroações	Faixa de Ganho (%)	Faixa de Custo (US\$)
Redução das resistências hidro e aerodinâmica	0,5 – 15,9	9.754 – 185.088
Otimização do sistema de propulsão	0,1 – 14,6	17.157 – 523.033
Melhoria da concepção energética	0,1 – 8,1	50.662 – 2.012.816

Fonte: BRASIL/ANTAQ, 2011a, 2013b; FABER et al., 2010; ICCT, 2011b

3.1.3 AERONAVES

Os principais fatores relacionados com o consumo energético das aeronaves englobam a fuselagem (parte aerodinâmica de sustentação e arrasto e o peso) e a queima de combustível (parte do motor – impulso e termodinâmica). Desde o lançamento do Comet 4 de 1958 até o uso do Airbus A380 de 2007, o consumo de combustível de aviões a jato foi reduzido em mais de 40%, enquanto a queima de combustível por assento caiu em mais de 70% na média mundial (ATD, 2009).

Uma série de opções tecnológicas está disponível para limitar o crescimento rápido das emissões de GEE da aviação. Essas opções incluem novos sistemas avançados de propulsão, materiais leves, melhorias quanto à aerodinâmica, novos projetos e estruturas (MCCOLLUM; GOULD; GREENE, 2009). Cabe destacar que o tempo médio de vida de uma aeronave é de 25 anos, período durante o qual várias novas gerações de tecnologias de economia de combustível são desenvolvidas (ATAG, 2010). Algumas dessas novas tecnologias somente estarão disponíveis para os novos modelos de aeronaves, contudo algumas opções são disponibilizadas para o *retrofitting* nas aeronaves existentes.

3.1.3.1 AERODINÂMICA

Melhorar a aerodinâmica de um avião, em particular, requer o aumento da razão sustentação/arrasto e oferece o maior potencial de redução de consumo de combustível nas aeronaves e, conseqüentemente, de emissões de GEE no longo prazo. Dentre as melhorias aerodinâmicas, podem ser citadas as opções comercialmente disponíveis, como aumento da envergadura das aeronaves (*wingspan*), aprimoramento dos *winglets*. Há, ainda, opções avançadas que incluem novos *designs* de aeronaves (*blended wing body* – BWB) e materiais leves avançados (laminado de fibra e metal) (MCCOLLUM; GOULD; GREENE, 2009).

3.1.3.2 REDUÇÃO DE MASSA

De acordo com o Air Transport Department (ATD, 2009), quanto mais leve a aeronave, menor é o impulso necessário a partir do motor e, conseqüentemente, menor será o consumo de combustível. Nos últimos anos, os fabricantes introduziram novas estruturas no interior das aeronaves compostas por liga leve e fibra de carbono como meio de reduzir o peso das aeronaves.

Durante 25 anos de operações, é provável que uma aeronave se beneficie de pelo menos duas ou três mudanças completas em seu interior para acomodar painéis, cozinhas e assentos mais leves, mas há outras modificações importantes e cabíveis para uma aeronave em serviço. Um avião de grande porte pode ser construído com mais de 1 milhão de peças. Quando chega o momento de uma grande revisão, mudanças relacionadas a componentes como iluminação, circuitos elétricos e sistemas de combustível podem gerar redução significativa do peso da aeronave. Revisões rotineiras incluem inspeção das superfícies externas da aeronave e manutenção para identificar e corrigir defeitos – incluindo lascados na pintura, arranhões e selos danificados.

Em uma aeronave, redução de peso equivale a redução de consumo de combustível e, por conseguinte, redução de emissões de GEE. Nos últimos anos, os operadores de aeronaves, bem como os fabricantes, têm apostado em novas formas de reduzir o peso das aeronaves que operam. Possíveis adaptações ou mudanças podem ser realizadas, dentre elas:

- I) Materiais mais leves como fibra de carbono em substituição à fibra de alumínio;
- II) Carrinho de refeições e bebidas 9 kg mais leve;
- III) Assentos de fibras de carbono em substituição aos de fibra de alumínio;
- IV) Eliminação das refeições quentes em voos selecionados permite a remoção de fornos, compactadores de resíduos e, possivelmente, cozinhas inteiras.

Essas medidas conjugadas podem reduzir o consumo de combustível de uma aeronave em até 0,5% (ATAG, 2010). Além disso, grande parte das alterações praticamente não reflete em custos para as companhias aéreas e pode ser implementada nas aeronaves em serviço.

3.1.3.3 MOTOR

As principais métricas de um sistema de propulsão que influenciam o consumo de combustível e, consequentemente, as emissões de CO₂ são (UK/DFT, 2010b):

- I) Eficiência termodinâmica;
- II) Eficiência propulsiva;
- III) Peso dos sistemas associados.

Segundo o Department for Transport (UK/DFT, 2010b), aproximadamente metade das futuras reduções de consumo de combustível previstas para as próximas décadas em aeronaves virá de melhorias associadas a ganhos de eficiência dos motores. Entretanto, há um equilíbrio envolvido quando se considera redução de emissões de CO₂, uma vez que geralmente há um *trade-off* entre o controle de emissões de NOx e de consumo de combustível. Portanto, controlar NOx conduzirá normalmente a um pequeno aumento nas emissões de CO₂. Contudo, é possível reduzir o consumo de combustível e as emissões atmosféricas de GEE em até 33% com relação aos níveis atuais de emissão adotando motores mais eficientes, por exemplo:

Unducted fan (UDF)/Open rotor: baixo consumo de combustível devido a maior eficiência propulsiva. Os motores UDF foram testados tecnicamente e são considerados adequados para aeronaves de percursos de médias e longas distâncias;

Geared turbofan (GTF): a arquitetura convencional de um motor a jato típico adequa-se diretamente à turbina de baixa pressão e à hélice por um eixo rígido rotativo referido como *direct drive turbo fan*. No entanto,

esse arranjo herdou ineficiências uma vez que a hélice apresenta melhor desempenho em baixa velocidade, enquanto a turbina é mais eficiente em alta velocidade. Para endereçar essa questão, os fabricantes de motores consideraram a introdução de engrenagens para reduzir a velocidade rotacional da hélice e consumo de combustível entre 12% e 15% comparativamente a outros motores com mesmo arrasto. Essa adequação permite um motor mais silencioso, com menores emissões de CO₂, e um custo de manutenção 30% inferior.

3.1.3.4 SÍNTESE

A Tabela 54 exibe o resumo dos ganhos de eficiência com as opções tecnológicas consideradas para as aeronaves, sendo que os custos de redução de peso e melhorias aerodinâmicas podem ser considerados desprezíveis se comparados ao valor total da aeronave (ex.: troca de equipamentos para redução de peso, colocação de *winglets*).

Tabela 54 – Ganhos de Eficiência e Custos das Tecnologias Incrementais nas Aeronaves

Macroações	Faixa de Ganho (%)	Faixa de Custo (10 ⁶ US\$)
Redução de peso	1 – 33	Desprezível
Motores mais eficientes	1 – 33	5 – 20
Melhorias aerodinâmicas	1 – 33	Desprezível
Melhorias aerodinâmicas avançadas	35	Desprezível

Fonte: ATAG, 2010; UK/DFT, 2010b; MCCOLLUM; GOULD; GREENE, 2009; TOSCA, 2011

3.1.4 TRENS

O transporte ferroviário é, na atualidade, um dos modais que apresenta a maior eficiência energética (passageiros por quilômetro ou toneladas por quilômetro) (USA/DOT, 2014). O modal é tido como uma das principais soluções para as questões ligadas à mobilidade nos grandes centros urbanos e ao transporte de cargas em longas distâncias.

Apesar da alta eficiência, ainda existem medidas que podem melhorar o desempenho e garantir ganhos adicionais para a sociedade. Dentre as medidas que oferecem aumento da eficiência no setor ferroviário, podem-se mencionar ações como melhorias aerodinâmicas, redução de peso, automação na gestão e operação da frota e ações de controle relacionadas a aceleração e frenagem dos trens.

3.1.4.1 AERODINÂMICA

Melhorias aerodinâmicas podem levar a aumentos de eficiência por meio da redução do arrasto aerodinâmico, especialmente em TAV (VYAS; PATEL; BERTRAM, 2013). No caso de TAV, dado o presente estado da tecnologia, o incremento de velocidade de 280 km/h para 350 km/h poderia aumentar os custos de energia em cerca de 60% (IZT, 2003). A redução no arrasto aerodinâmico em vagões, no transporte de cargas, também apresenta oportunidades de melhorias sem a necessidade de substituição do material rodante. Pode-se, por exemplo, minimizar o distanciamento dos vagões e instalar cobertura em vagões abertos.

3.1.4.2 REDUÇÃO DE MASSA

Peso é um fator decisivo para determinar a demanda energética de um trem. A substituição do aço – tradicionalmente usado como principal material na fabricação dos trens – por novos materiais abre espaço para redução de peso da frota ferroviária. O uso de materiais já conhecidos gera potencial para tornar locomotivas e vagões mais leves. Além das questões relacionadas à fabricação do trem, a substituição de controles mecânicos por sistemas eletrônicos do material rodante pode auxiliar nas reduções adicionais de peso (IZT, 2003).

Como consequência da redução de peso das composições, aumenta-se a carga útil transportada, o que leva a uma melhora global na eficiência do conjunto. No entanto, dois principais fatores surgem como desafios para medidas de redução de massa: a segurança e o atual custo de materiais alternativos ao aço. Apesar do aumento esperado no fator de carga do trem, o uso de materiais alternativos pode impactar a capacidade dos vagões de suportar cargas elevadas e eventualmente reduzir a segurança no transporte.

3.1.4.3 EMPILHAMENTO DE CONTÊINERES

A adoção de medidas como o empilhamento de contêineres no transporte de cargas representa outro potencial de melhoria incremental na frota atual, pois pode contribuir para a redução do número de vagões e aumentar o fator de carga do trem (ICF, 2009). Entretanto, devido ao aumento de peso por unidade da composição, novos investimentos podem ser necessários em ferrovias que não estejam aptas a suportar o incremento de carga gerado por essa medida. Além disso, os vagões precisam ser baixos para que não sejam excedidos determinados limites de altura.

3.1.4.4 AUTOMAÇÃO, OPERAÇÃO DA FROTA E FRENAGEM

Sistemas computacionais aliados ao uso de dispositivos eletrônicos (sensores, *loggers* e GPS) também podem auxiliar na redução do consumo de combustível. Utilizando dados do trem e da frota em circulação (peso, localização, velocidade, grau de curvatura da linha férrea etc.), programas computacionais permitem que a locomotiva seja operada de maneira otimizada. Os *softwares* em questão podem, por exemplo, orientar o condutor da locomotiva a desacelerar o trem em determinado ponto antes da chegada de uma curva para que se evite o uso excessivo de freios. Pode-se também mencionar que novos dispositivos eletrônicos permitem que a frota de trens opere com maior proximidade. Desse modo, mais trens podem operar em uma mesma rota, o que leva a um consequente aumento do fator de capacidade da linha (AUSTRALIA/RET, 2012).

O uso de freios pneumáticos controlados eletronicamente (ECP)³¹ representa também uma alternativa para aumentar o desempenho da frota, seja pela redução do número de paradas ou pela manutenção do sistema de freios. O sistema de freios em trens convencionais tem tempo de resposta baixo e precisão limitada. O sistema ECP permite que a aplicação da frenagem ocorra de maneira uniforme em todo o trem, variando a intensidade da frenagem em cada carro da composição em função do peso transportado (VYAS; PATEL; BERTRAM, 2013).

31 Electronically controlled pneumatic.

3.1.4.5 LOCOMOTIVAS A DIESEL E ELÉTRICAS

A adoção de novas tecnologias de motores a diesel também apresenta potencial de redução do consumo de combustível. Os investimentos em pesquisa e desenvolvimento, oriundos das economias de escala da indústria automobilística, podem gerar ganhos de eficiência nos motores utilizados no transporte ferroviário a partir de adaptações (CHÉRON et al., 2011). A tecnologia desenvolvida para caminhões não pode ser aplicada diretamente para locomotivas e precisam ser adaptadas, pois trabalham em rotações menores e precisam ter duração de 40 anos (VYAS; PATEL; BERTRAM, 2013).

Nas locomotivas híbridas, o sistema de propulsão é caracterizado por um conjunto de baterias e gerador, operando de maneira similar a um veículo elétrico híbrido. Nessa configuração, pode-se utilizar um sistema de frenagem regenerativa, de modo que a energia despendida no processo de frenagem retorna ao sistema de armazenamento de energia do trem. Além disso, no sistema híbrido, pode-se operar o gerador a diesel em uma velocidade ótima, maximizando a eficiência para geração de eletricidade e reduzindo o consumo de combustível.

Da mesma maneira como apresentado para os trens híbridos, a incorporação de sistemas que permitam a recuperação de energia para uso posterior também é observada nos trens elétricos, principalmente para o transporte de passageiros. Atualmente, há soluções disponíveis baseadas no armazenamento de energia por meio de *fly-wheels*, baterias e supercapacitores (CHÉRON et al., 2011). Ademais, o desenvolvimento de novas tecnologias para controle de motores baseadas em eletrônica de potência tem gerado oportunidades adicionais de melhorias.

3.2 TECNOLOGIA VEICULAR AVANÇADA

3.2.1 VEÍCULOS AUTOMOTIVOS

3.2.1.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS A BATERIA

Os veículos elétricos a bateria (VEB) têm como única fonte de energia as baterias para acionar um ou mais motores elétricos. Tipicamente, um único motor elétrico está ligado ao eixo dianteiro por uma caixa de velocidades com apenas uma ou duas velocidades, mas existem várias outras possíveis variações nas arquiteturas do sistema propulsor. Uma variação significativa é a utilização de quatro pequenos motores em cada roda em vez de um único motor de acionamento (DELUCCHI; LIPMAN, 2010).

Os VEB já foram concorrentes dos automóveis a combustão interna em meados do século XIX (MIDLER; BEAUME, 2010), entretanto fatores como alto custo de produção, baixa autonomia e partida elétrica para o motor a combustão interna (MCI) selaram a superioridade do MCI no mercado (ABVE, 2013a).

A diferença entre um carro elétrico e um de MCI se dá basicamente na mudança do tipo de combustível e no motor utilizado. Os motores elétricos se dividem em dois tipos: de corrente contínua e de corrente alternada (KUMAR; JAIN, 2014). Uma importante vantagem comparativamente ao veículo a MCI é o alto rendimento do motor elétrico, usualmente superior a 90%, o que, juntamente com a frenagem regenerativa, torna a eficiência dos VEB maior que as outras categorias de veículos. Cabe ainda destacar o baixo nível de ruído do veículo e a pouca vibração do automóvel.

Para auxiliar no sistema de regeneração (em que o motor elétrico passa a atuar como gerador elétrico nos momentos de frenagem ou desaceleração), podem-se utilizar ultracapacitores com a finalidade de absorver rapidamente a energia regenerada, o que nem sempre uma bateria faz em curtos períodos de tempo. Os ultracapacitores podem ainda disponibilizar essa energia de forma rápida, auxiliando numa rápida aceleração do veículo.

Outra importante vantagem dos VEB é a menor complexidade do mecanismo de funcionamento, em comparação com os automóveis com MCI, sem a existência, por exemplo, de caixa de marchas, motor de arranque, equipamentos do sistema de exaustão – como o escapamento e o catalisador – e até mesmo de sistema de arrefecimento – como radiador, bomba de água, entre outros elementos.

Por outro lado, dentre as dificuldades encontradas na implementação de um VEB, pode-se citar a baixa autonomia do veículo. Enquanto um MCI percorre aproximadamente 480 km até um reabastecimento, um VEB faz entre 160~320 km (FISCHER; WERBER; SCHWARTZ, 2009). Para aumentar a autonomia do VEB, é preciso utilizar grandes bancos de baterias, o que resulta em grande espaço ocupado e excesso de peso. Nesse sentido, os veículos híbridos *plug-in* utilizam tanto o armazenamento eletroquímico de energia quanto combustíveis convencionais para superar essas deficiências do VEB. Ou seja, veículos híbridos *plug-in* diferem dos veículos elétricos, pois usam outras fontes de energia além de energia elétrica, e a bateria normalmente tem capacidade menor em comparação com o veículo elétrico. Dessa forma, os híbridos *plug-in* são vistos como um dos meios mais promissores para melhorar a sustentabilidade de curto prazo do setor de transportes (BRADLEY; FRANK, 2009), enquanto os VEB possivelmente responderão por um novo quadro estrutural, de longo prazo, do setor de transportes (IEA, 2011a).

Outro aspecto negativo está relacionado com o tempo de recarga do veículo a bateria. A recarga total leva, em média, de quatro a oito horas, e mesmo a recarga rápida, que recarrega 80% da capacidade total, demora cerca de 30 minutos (USA/FUEL ECONOMY, 2014b). Ademais, as baterias apresentam custo elevado e precisam ser trocadas mais de uma vez ao longo da vida útil do veículo (USA/FUEL ECONOMY, 2014b).

Atualmente, diversos veículos elétricos a bateria e híbridos *plug-in* estão disponíveis no mercado mundial. No mercado americano, por exemplo, mais de 24 diferentes modelos estão disponíveis para o consumidor (USA/ORNL, 2013). Os principais VEB e híbridos *plug-in* com suas especificações estão apresentados na Tabela 55.

Tabela 55 – Principais VEB e Híbridos *Plug-in* Comercializados

Montadora	Veículo	Tipo	Motor (kW)	Bateria (kWh)	Autonomia (km)	Desempenho Energético (km/kWh) ¹⁴	Preço (US\$)
Nissan	Leaf	VEB	80	24,00	135	5,37	28.231
Chevrolet	Volt	<i>plug-in</i>	111	17,10	61	4,67	58.525
Toyota	Prius PHEV	<i>plug-in</i>	60	4,40	18	4,53	34.905
Tesla	Model S	VEB	225	60,00	335	4,60	69.900
Mitsubishi	Outlander PHEV	<i>plug-in</i>	120	12,00	53	4,42	48.456
Renault	Zoe	VEB	65	22,00	210	6,67	23.682
Volvo	V60 PHEV	<i>plug-in</i>	52	11,20	50	4,46	75.799
Ford	C-Max Energi	<i>plug-in</i>	68	7,60	32	4,20	32.920
Ford	Fusion Energi	<i>plug-in</i>	88	7,60	32	4,20	36.500
Renault	Kangoo Maxi Z.E.	VEB	44	22,00	170	6,06	43.735
Smart	Smart Fortwo	VEB	55	17,60	100	5,03	28.000
Chery	QQ3 EV	VEB	12		120	10,00	8.501
Vauxhall	Ampera	<i>plug-in</i>	111	16,00	84	5,25	49.220
Mitsubishi	iMiev	VEB	47	16,00	100	5,37	22.995
Ford	Focus Electric	VEB	107	23,00	122	5,03	35.170
Renault	Twizy	VEB	13	6,10	100	8,33	11.804
Jac	J3 EV	VEB		19,00	130	7,14	25.438
BYD	e6	VEB	90	61,40	205	3,00	35.000
VW	e-Up!	VEB	60	18,70	150	8,55	32.990
Citroën	C-Zero	VEB	47	16,00	150	7,41	36.322
Renault	Fluence Z.E.	VEB	70	22,00	185	5,88	39.111
BMW	i3	VEB	125	18,80	130	5,96	44.272
Peugeot	iOn	VEB	47	16,00	150	7,75	21.250
VW	e-Golf	VEB	85	24,20	190	7,87	44.247

Fonte: USA/FUEL ECONOMY, 2014b; NEXT GREEN CAR, 2014

As vendas globais de VEB e híbridos *plug-in* dobraram nos últimos dois anos, de cerca de 45 mil veículos vendidos, em 2011, para mais de 200 mil, em 2013 (MOCK; YANG, 2014). No entanto, em 2013, a adesão dos consumidores de VEB e híbridos *plug-in* foi limitada a menos de 1% das vendas dos principais mercados automobilísticos, com exceção de regiões como Noruega (6,1%), Holanda (5,6%) e Califórnia (4,0%) (MOCK; YANG, 2014).

32 Não considera o desempenho energético do combustível líquido, no caso dos veículos híbridos *plug-in*.

A alta participação dos VEB e híbridos *plug-in* no mercado norueguês e holandês reflete os incentivos fiscais oferecidos nessas regiões, com subsídios governamentais e redução de impostos. Na Noruega, o incentivo fiscal é de cerca de € 11.500 para os VEB (equivalente a cerca de 55% do preço base do veículo) e, na Holanda, o incentivo fiscal é da ordem de € 38.000 para os híbridos *plug-in* (equivalente a cerca de 75% do preço base do veículo) (MOCK; YANG, 2014).

No Brasil, ainda não são comercializados veículos elétricos e híbridos *plug-in*. Em 2013, havia menos de mil carros elétricos em circulação no país (ABVE, 2013b). Entretanto, a Nissan tem o modelo Leaf à disposição de órgãos governamentais e táxis. Atualmente, no país, projetos-piloto com o Nissan Leaf são desenvolvidos com frotas de táxis no Rio de Janeiro e São Paulo e em testes da Polícia e do Corpo de Bombeiros do Rio de Janeiro (NISSAN, 2014a). Ademais, a usina hidrelétrica Itaipu Binacional, em parceria com a KWO e com a Fiat, desenvolve um projeto que atualmente dispõe de dois veículos elétricos em circulação (ITAIPU, 2014), além de a Mitsubishi ter demonstrado interesse em comercializar seus veículos elétricos no mercado brasileiro (ABVE, 2013b).

O maior desafio tecnológico dos VEB e híbridos *plug-in* está relacionado com a bateria, que tem relação direta com os elevados custos e a baixa autonomia do veículo. A bateria consiste em um dispositivo que armazena energia por meio de um processo eletroquímico, disponibilizando essa energia para uso por meio de eletricidade. As três principais características de uma bateria são a energia específica mássica, a potência específica mássica e o tempo de vida útil. A energia específica mássica consiste na quantidade de energia armazenada pela bateria por unidade de massa; a potência específica mássica é a potência fornecida por unidade de massa; o tempo de vida útil corresponde ao número de ciclos de carga/descarga a que pode ser sujeita.

Os requerimentos técnicos exigidos para as baterias são diferentes para cada tipo de veículo. Os VEB necessitam de baterias com maiores densidades de energia, limitando-as devido às massas e aos volumes associados, o que contribui para uma baixa autonomia desse tipo de veículo. Uma vez que nos VEB as baterias constituem a única fonte de energia a bordo, estas sofrem descargas mais profundas, o que exige baterias mais robustas, com tempo de vida longo e aceitação de um número elevado de ciclos de carga e recarga. Os veículos elétricos híbridos, por sua vez, podem ser atendidos por baterias com menor energia específica mássica, mas uma elevada capacidade de potência se faz necessária. Nestes, as descargas das baterias são em geral menos profundas que para os veículos elétricos puros.

Existem basicamente duas categorias de baterias. As primárias são aquelas que não podem ser recarregadas. Produzem energia a partir de reação eletroquímica, geralmente irreversível, o que as inutiliza. As secundárias são aquelas que podem ser recarregadas por uma fonte de alimentação externa. Uma bateria secundária pode ser carregada e descarregada muitas vezes. As principais tecnologias de baterias recarregáveis resumem-se a baterias de chumbo-ácidas (Pb), níquel-cádmio (Ni-Cd), hidreto metálico de níquel (Ni-Mh) e íon de lítio (Li-ion).

As baterias de chumbo-ácido são as mais antigas ainda em uso, desde 1860 (KURZWEIL, 2010). Elas necessitam de manutenção periódica por meio da reposição de água destilada (DHAMEJA, 2002a). A maior vantagem das baterias de chumbo-ácido é o domínio total da tecnologia devido ao seu maior tempo de mercado, o que faz com que seu preço seja o menor dentre todas. Porém, produzem gases perigosos quando usadas e, se a bateria for usada em demasia, aumenta os riscos de explosões (DHAMEJA, 2002b).

As baterias níquel-cádmio apresentam energias e potências específicas superiores às das baterias chumbo-ácidas. Porém, devido ao cádmio ser uma substância potencialmente cancerígena, a produção e a aplicação dessas baterias não são atrativas para o uso automotivo.

As baterias de hidreto metálico de níquel entraram no mercado em 1991 (FETCENKO et al., 2007). Nestas, o cádmio foi substituído por uma liga metálica com hidrogênio. Elas têm alta densidade de energia e não contêm metais tóxicos, por isso são fáceis de reciclar e são livres de manutenção.

O tipo de bateria mais promissor apresentado nos últimos anos foi o de íon de lítio. Essas baterias começaram a ser comercializadas no início de 1991, no mercado de celulares e *laptops* (BARRÉ et al., 2013). Por terem alta densidade de energia, tornam-se as melhores candidatas para a aplicação do carro elétrico (KUMAR; JAIN, 2014), além de não perderem carga quando não são utilizadas (autodescarga) (BARRÉ et al., 2013). A Tabela 56 exhibe as principais características dos diferentes tipos de baterias.

Tabela 56 – Características dos Principais Tipos de Baterias

	Pb	Ni-Cd	Ni-Mh	Li-Ion
Custo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Energia específica mássica (Wh/kg)	20 – 50	50 – 60	40 – 100	40 – 250
Potência específica mássica (W/kg)	75 – 300	120 – 200	170 – 350	200 – 1000
Número de ciclos (carga/descarga)	200 – 500	1.000	1.000	1.200
Autodescarga por mês (% do total)	Baixa (5%)	Moderada (20%)	Alta (30%)	Baixa (10%)

Fonte: BURKE; MILLER, 2011; CAPASSO; VENERI, 2014; DHAMEJA, 2002a, 2002b; FISCHER; WERBER; SCHWARTZ, 2009; GERSSEN-GONDELACH; FAALJ, 2012; SHARAF; ORHAN, 2014; VALSERA-NARANJO et al., 2009

Os custos das baterias de íons de lítio variam entre 500-650 US\$/kWh, tornando-se uma importante parte dos custos do veículo, dependendo do tamanho da bateria. O Nissan Leaf, por exemplo, tem uma bateria de 24 kWh que custa cerca de US\$ 12 mil, representando cerca de um terço do preço do veículo no mercado americano (IEA, 2013b). De forma similar, o Ford Focus Elétrico tem uma bateria que custa entre US\$ 12 mil e US\$ 15 mil, sendo que a versão a gasolina do Ford Focus custa US\$ 22 mil no mercado americano (IEA, 2013b).

O custo dos veículos híbridos *plug-in* pode ser mais elevado devido à complexidade da motorização dupla. O Chevrolet Volt, por exemplo, utiliza um pacote de bateria de 16 kWh, mas seu preço é cerca de US\$ 5 mil superior em relação ao Nissan Leaf (IEA, 2013b).

É de se esperar que a fabricação em escala resulte em reduções de custo, mas a extensão dessas reduções dependerá do volume de produção. Ademais, deve-se ter em mente que os custos de produção da bateria são sensíveis aos preços das *commodities* dos metais constituintes, que introduzem incerteza adicional em projeções de longo prazo (KARPLUS; PALTSEV; REILLY, 2010)

O desempenho energético dos VEB e híbridos *plug-in* difere de acordo com a arquitetura dos veículos, assim como também podem se alterar por conta do gerenciamento de carga. Para os VEB, a Agência Internacional de Energia (IEA, 2011a) considera que os veículos têm autonomia típica de 125 km a 150 km com 30 kWh de energia nas baterias, o que reflete um desempenho energético médio de 5,0 km/kWh a 6,7 km/kWh, com alguma capacidade adicional de reserva da bateria. Por outro lado, Vliet et al. (2011) apresentam valores mais otimistas em suas simulações: o desempenho energético dos VEB oscila de 6,1 km/kWh a 10,8 km/kWh. Lucas, Alexandra Silva e Costa Neto (2012), por sua vez, admitem valores de 6,7 km/kWh para os VEB. Entre os VEB produzidos e comercializados nos últimos anos, o desempenho energético oscila entre 5 km/kWh e 10 km/kWh, como apresentado na Tabela 57.

Tabela 57 – Valores Médios dos Veículos Elétricos por Tipo de Bateria

	Pb	Ni-Mh	Li-Ion
Potência do motor (kW)	75	50	75
Energia da bateria (kWh)	18	28	25
Velocidade máxima (Km/h)	150	130	130
Autonomia (km)	100	150	130
Desempenho energético (km/kWh)	5,0	5,0	6,0

Fonte: CITROEN, 2014; USA/DOE, 2014; HONDA EV, 2014; USA/INL, 2014a, 2014b; MITSUBISHI, 2014; NISSAN, 2014b; RENAULT, 2014; SMART EV, 2014; SPEED MASTI, 2014; ZHAN et al., 1999

No que diz respeito aos ônibus elétricos, sua produção não é tão difundida quanto os veículos leves (LAJUNEN, 2014). Entretanto, alguns ônibus já começaram a ser comercializados, como o ônibus elétrico da BYD, com autonomia de 250 km e desempenho energético de 0,8 km/kWh (BYD, 2014). Em 2013, foi lançado o primeiro ônibus elétrico brasileiro movido 100% a baterias, o E-Bus. O veículo tem autonomia operacional de 200 km, considerando recargas rápidas, e estará em testes no Corredor ABD, na Grande São Paulo, operando no trecho Diadema-Brooklin, e as baterias poderão ser recarregadas no terminal, de acordo com a necessidade da operação (MERCEDES-BENZ, 2013).

3.2.1.2 VEÍCULOS A CÉLULA A COMBUSTÍVEL

Célula a combustível é um dispositivo conversor eletroquímico que depende da alimentação contínua de um combustível para produzir eletricidade em corrente contínua e, como subproduto, produz calor e água. O combustível mais usado é o hidrogênio puro, mas já é estudada a possibilidade de uso de outros combustíveis que tenham o hidrogênio em sua composição, como o etanol (ADAMSON, 2007). Porém, este gera mais subprodutos, como o gás metano, mas em quantidades muito menores que o motor a combustão interna convencional (BOWERS et al., 2007).

Os componentes básicos da célula a combustível são dois eletrodos (positivo e negativo) e um eletrólito intermediário capaz de transferir íons positivos nas duas direções enquanto o fluxo de elétrons correspondente no circuito externo demanda energia ou usa energia para gerar combustível (SØRENSEN, 2005). Para a produção de energia elétrica na célula a combustível, o gás hidrogênio é direcionado ao eletrodo negativo (anodo), onde perde elétrons e forma íons H^+ capazes de

atravessar o eletrólito enquanto os elétrons passam pelo circuito externo. O gás oxigênio, de forma similar, é direcionado ao eletrodo positivo (catodo), onde há uma reação mais complexa que libera água (SØRENSEN, 2005). A Figura 70 apresenta o esquema do princípio de funcionamento de uma célula a combustível.

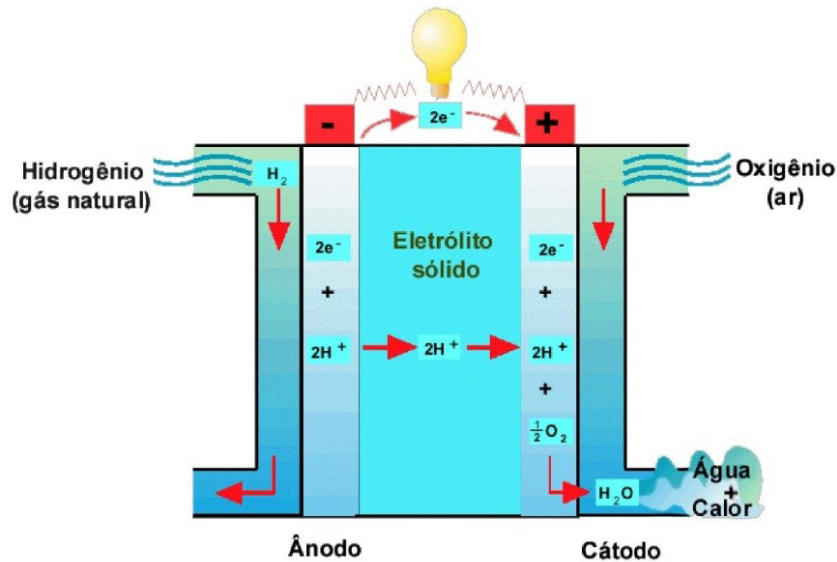


Figura 70 – Funcionamento Básico de uma Célula a Combustível

Fonte: ELECTROCELL, 2014

As células a combustível são convencionalmente caracterizadas de acordo com o material do seu eletrólito e são diferentes na potência de saída, temperatura de operação, eficiência elétrica e aplicações típicas (SHARAF; ORHAN, 2014). Algumas das células a combustível mais discutidas são:

PEMFC (célula a combustível por membrana de troca de prótons): é ideal para aplicações em transportes por trabalhar em baixas temperaturas, responder rapidamente à troca de cargas elétricas e suportar grande quantidade de ciclos térmicos (HU; CAO, 2014);

AFC (célula a combustível alcalina): tem como principal vantagem seu custo, que é bem reduzido em comparação à PEMFC, entretanto não existe aplicação móvel para esse tipo de célula. Sendo assim, a AFC tem como foco apenas aplicações estacionárias (VERHAERT et al., 2012);

PAFC (célula a combustível de ácido fosfórico): não necessita de hidrogênio puro para operar, funcionando facilmente com combustíveis fósseis reformados. Esse tipo de célula trabalha com temperaturas médias da ordem de 150°C a 220°C (MEKHILEF; SAIDUR; SAFARI, 2012);

MCFC (célula a combustível de carbonato fundido) e SOFC (célula a combustível de óxido sólido): diferentes das anteriores, trabalham com altas temperaturas (superiores a 640°C para MCFC e de 750°C a 1.000°C para SOFC), o que lhes dá a vantagem de trabalhar com outros ciclos térmicos integrados, possibilitando aumento da eficiência térmica. Entretanto, só têm aplicações estacionárias (FALCUCCI et al., 2012; REXED; LAGERGREN; LINDBERGH, 2014; ROKNI, 2013).

Célula a combustível, motor a combustão interna e baterias apresentam algumas características em comum. Porém existem vantagens e desvantagens que devem ser levadas em consideração para a escolha de cada uma dessas tecnologias. O Quadro 3 mostra o comparativo das características das três tecnologias.

Quadro 3 – Comparação entre Célula a Combustível, Bateria e Motor a Combustão Interna

Comparação	Célula a Combustível	Bateria	Motor a combustão
Função	Conversor de energia	Armazenador e conversor de energia	Conversor de energia
Tecnologia	Reações eletroquímicas	Reações eletroquímicas	Combustão
Combustível típico	Hidrogênio puro usualmente	Produtos químicos armazenados	Gasolina, diesel
Saída útil	Corrente contínua	Corrente contínua	Energia mecânica
Principais vantagens	Alta eficiência, reduz emissão de poluentes	Alta eficiência, bem desenvolvido	Bem desenvolvido, baixo custo
Principais desvantagens	Alto custo, baixa durabilidade	Baixo ciclo operacional, baixa durabilidade	Significativa emissão de poluentes, baixa eficiência

Fonte: SHARAF; ORHAN, 2014

Os veículos a célula a combustível (VCC), além de elevada eficiência de conversão, podendo chegar a 60% até 2015 (POLLET; STAFFELL; SHANG, 2012), apresentam menor tempo de abastecimento quando comparados aos VEB. Usam como componentes básicos a célula a combustível, sistema de armazenamento para o hidrogênio, radiador para a célula, unidade de controle de potência e motor elétrico, assim como os veículos a bateria (SHARAF; ORHAN, 2014). A Tabela 58 apresenta o comparativo técnico-econômico das células a combustíveis (PEMFC) em relação às principais tecnologias de propulsão disponíveis atualmente.

Tabela 58 – Comparação Técnico-Econômica entre as PEMFC e Seus Concorrentes para Propulsão³³

Tecnologia	Potência (kW)	Eficiência ¹⁵ (%)	Energia Específica (kW/kg)	Autonomia (km)	Custo (\$/kW)
PEMFC (on-board)	10-300	40-45	400-1000	350-500	100
PEMFC (off-board)	10-300	50-55	400-1000	200-300	100
Motor gasolina	10-300	15-25	>1000	600	20-50
Motor diesel	10-200	30-35	>1000	800	20-50
Híbrido diesel/bateria	50-100	45	>1000	>800	50-80
Híbrido gasolina/bateria	10-100	40-50	>1000	>800	50-80
Veículo elétrico (Ni-Mh)	10-100	65	100-400	100-300	>100

Fonte: SHARAF; ORHAN, 2014

33 Entrada e saída de energia elétrica.

Tendo em vista que o hidrogênio é um vetor energético, há necessidade de produção do combustível para o uso nas células a combustível. Esse processo de conversão pode ser feito basicamente de duas formas: *off-board* e *on-board*. No primeiro caso, o hidrogênio requerido para alimentar a célula a combustível é produzido fora do veículo e transportado para postos de distribuição. Em seguida, é realizado o armazenamento do hidrogênio dentro do veículo (SHARAF; ORHAN, 2014). Como hoje a infraestrutura para realização desse procedimento é cara (AHLUWALIA; HUA; PENG, 2012) e o acesso comercial ao hidrogênio é limitado, discute-se sobre a produção de hidrogênio no veículo (*on-board*). Nesse caso, são utilizados combustíveis convencionais com hidrogênio em sua composição mais acessíveis comercialmente, como etanol ou metanol, e a produção do hidrogênio é feita internamente no veículo (BOWERS et al., 2007).

Independentemente da forma de produção do hidrogênio, um dos grandes desafios do veículo a célula a combustível está relacionado com o armazenamento, que pode ser feito utilizando-se hidrogênio comprimido, hidrogênio líquido, metal hidreto, entre outros (AHLUWALIA; HUA; PENG, 2012). O hidrogênio comprimido armazena hidrogênio em um tanque em alta pressão e tem como vantagem usar diretamente o hidrogênio sem necessidade de processamento. Porém, o volume necessário para uma autonomia adequada é muito elevado. O hidrogênio líquido, por sua vez, tem como vantagem a necessidade de um volume menor de armazenamento. Entretanto, apresenta eficiência muito baixa e perda de hidrogênio quando o veículo se mantém parado por longo tempo. Os metais hidretos têm como principal vantagem usar combustíveis mais acessíveis que o hidrogênio, mas são termicamente instáveis e, em sua fase térmica estável, seu nível de energia é muito baixo, o que torna seu uso inviável.

Em média, os VCC apresentam autonomia de 400 km, com velocidade máxima de 160 km/h e desempenho energético de 28 km/litro de hidrogênio. Entretanto, ainda existem muitas barreiras para a implementação em larga escala dos VCC, como custo e durabilidade (SHARAF; ORHAN, 2014). Outro aspecto que deve ser levado em consideração para viabilizar esse tipo de tecnologia é a infraestrutura para abastecimento.

Mundialmente, a produção dos VCC é baixa e, atualmente, restringe-se aos veículos experimentais (protótipos). A Hyundai já anunciou sua primeira linha de produção em massa e espera que até 2015 seja capaz de produzir o veículo com um custo de US\$ 50.000 por unidade (FUEL CELLS BULLETIN, 2013), preço 43% superior ao modelo equivalente a combustão interna (ICARROS, 2014). Esse valor é semelhante ao preço do VCC da Toyota, que tem previsão de lançamento em 2015 (BLOOMBERG, 2010). No horizonte 2030, a expectativa é que o valor do veículo seja reduzido para US\$ 23.000 (VEZIROGLU; MACARIO, 2011). A Tabela 59 apresenta os principais veículos experimentais a célula a combustível produzidos atualmente.

Tabela 59 – Principais Protótipos de Veículos a Célula a Combustível

Montadora	Veículo	Tipo	Motor (kW)	Combustível	Autonomia (km)	Desempenho Energético (km/l de H ₂)
Mercedes	Mercedes Benz F 125!	Híbrido CC/ Bateria	n.d.	H ₂ comprimido	952	34,00
Mercedes	Mercedes Benz B-Class F-Cell	Célula a combustível	90	H ₂ comprimido	385	22,95
Mercedes	Mercedes Benz Blue Zero F-Cell	Híbrido CC/ Bateria	n.d.	n.d.	400	34,42
n.d.	A-Class F-Cell	Híbrido CC/ Bateria	85	H ₂ comprimido	145	23,80
n.d.	Natrium	Híbrido CC/ Bateria	54	Borohidreto de sódio	483	12,75
n.d.	Jeep Commander 2 (SUV)	Híbrido CC/ Bateria	50	Metanol	190	10,20
n.d.	NECAR 4	Célula a combustível	85	H ₂ comprimido	200	22,52
Ford Motor	HySeries Edge	Híbrido CC/ Bateria	n.d.	n.d.	491	34,00
Fiat	Panda	Célula a combustível	60	H ₂ comprimido	200	n.d.
GM	Provoq	Híbrido CC/ Bateria	80	H ₂ comprimido	483	n.d.
GreenGT	LMP H2 prototype	Célula a combustível	300	H ₂ comprimido	n.d.	n.d.
Honda	FC Sport concept	Célula a combustível	n.d.	H ₂ comprimido	n.d.	n.d.
Honda	FCX Clarity	Célula a combustível	100	H ₂ comprimido	570	n.d.
Hyundai	ix35	Híbrido CC/ Bateria	100	H ₂	587	n.d.
Hyundai	Blue2	Híbrido CC/ Bateria	90	n.d.	n.d.	41,90
Hyundai	Tucson ix	Híbrido CC/ Bateria	100	H ₂ comprimido	650	29,75
Hyundai	Tucson ix35 FCEV	Híbrido CC/ Supercap	n.d.	H ₂ comprimido	368	31,02
Intelligent Energy	Fuel Cell Black Cabs	Célula a combustível	n.d.	H ₂ comprimido	400	n.d.
Kia	Borrego/ Mojave FCEV	Híbrido CC/ Supercap	115	H ₂ comprimido	685	25,50

Montadora	Veículo	Tipo	Motor (kW)	Combustível	Autonomia (km)	Desempenho Energético (km/l de H ₂)
Kia	Sportage II	Híbrido CC/ Bateria	100	H ₂ comprimido	328	22,95
Mazda	Premacy FCEV	Célula a combustível	85	Metanol	n.d.	n.d.
Mistubishi	Grandis FCV	Híbrido CC/ Bateria	68	H ₂ comprimido	150	n.d.
Nissan	TeRRA	Célula a combustível	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Nissan	X_TRAIL(SUV)	Híbrido CC/ Bateria	75	H ₂ comprimido	n.d.	n.d.
Peugeot Citroen	307cc FiSyPAC F/C Hybrid	Híbrido CC/ Bateria	n.d.	n.d.	496	26,35
Renault	Scenic FCV H2	Híbrido CC/ Bateria	90	n.d.	240	n.d.
Suzuki	SX4-FCV	Célula a combustível	80	H ₂ comprimido	250	n.d.
Toyota	FCV-R concept	Híbrido CC/ Bateria	n.d.	H ₂ comprimido	700	n.d.
Toyota	FCHV-adv	Híbrido CC/ Bateria	n.d.	n.d.	830	n.d.
Volvo	C3D	Híbrido CC/ Bateria	n.d.	H ₂ reformado da gasolina	400	n.d.
Audi	Q5 HFC	Híbrido CC/ Bateria	98	H ₂ comprimido	n.d.	n.d.
Audi	A2	Híbrido CC/ Bateria	65	H ₂ comprimido	220	n.d.

Nota CC: Célula a Combustível. Supercap: Supercapacitor. n.d.: Não disponível

Fonte: FUEL CELLS, 2012

Os veículos pesados a célula a combustível (ônibus e caminhões) são formados basicamente pelos mesmos componentes que os leves, porém a célula a combustível de ácido fosfórico (PAFC) é mais utilizada que a PEMFC. Uma preocupação diferencial com relação ao ônibus é o percurso. Melo, Ribau e Silva (2014) mostram que um trajeto com mais paradas, mesmo que menor, exige maior consumo de combustível. A solução do ônibus a célula a combustível é utilizar sistemas de baterias nos momentos de partidas e picos de maior demanda de energia.

Na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), em São Paulo, existe o projeto do ônibus a célula a combustível com capacidade para 90 passageiros e autonomia de 300 km (NEVES; PINTO, 2013). Também existe projeto semelhante na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), em que o ônibus tem um sistema com motor elétrico e célula a combustível e autonomia de 300 km (COPPE, 2014). Segundo Eudy, Chandler e Gikakis (2012), a expectativa de custos no curto prazo para os ônibus a célula a combustível é da ordem de US\$ 1.000.000 e, para o longo prazo, de US\$ 600.000.

3.2.2 EMBARCAÇÕES

Para o transporte hidroviário, parte significativa das ações consideradas avançadas tecnologicamente são aquelas que utilizam energia renovável. Como solução de maior ganho de eficiência energética, dentre essas oportunidades, o equipamento *towing kite* (Figura 71) utiliza-se de uma pipa instalada na proa para reduzir a potência exigida pelo sistema de propulsão e um sistema de controle que possibilita o melhor aproveitamento do vento tanto da direção quanto da velocidade (ERHARD; STRAUCH, 2013; FABER et al., 2010). Para as embarcações comercialmente disponíveis, as reduções mínimas e máximas do consumo de combustível e os custos de investimento e operação do sistema *towing kite* estão demonstradas na Tabela 60.

Tabela 60 – Ganhos de Eficiência e Custos do Sistema *Towing Kite*

Tipo de Embarcação	Faixa de Ganho (%)	Custo (US\$)	Custo Operacional (US\$)
Petroleiro	2,9 – 5,7	987.100	64.280 – 82.640
Graneleiro	4,3 – 8,5	987.100	64.280 – 82.640
Gases liquefeitos	2,3 – 4,6	1.885.810	157.880 – 192.970
Tanque químico	5,4 – 10,8	1.885.810	157.880 – 192.970

Fonte: (FABER et al., 2010)

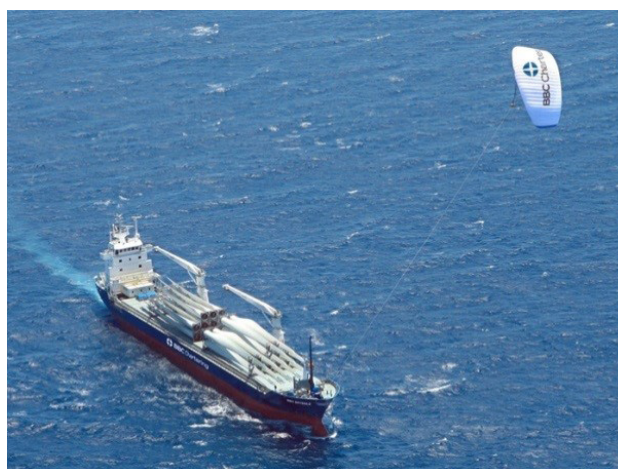


Figura 71 – Embarcação Provida de *Towing Kite*

Fonte: ERHARD; STRAUCH, 2013

Outra solução que utiliza a energia do vento é conhecida como rotores Flettner, que são navios projetados com rotores no convés para usar o efeito Magnus a fim de contribuir na sua propulsão, conforme pode ser observado na Figura 72. Para o caso da frota média brasileira, essa tecnologia poderia ser aplicável somente aos petroleiros, com ganho de eficiência energética de 6,6% e custos entre US\$ 720.000 e US\$ 900.00 (FABER et al., 2010).



Figura 72 – Ilustração de uma Embarcação Provida de Rotores Flettner

Fonte: WARTSILA, 2010

Tal como a solução de rotores Flettner, a geração de energia solar fotovoltaica é uma opção de energia renovável que exige grande espaço no convés da embarcação. Com base em uma capacidade instalada limitada a 40kWp e um custo de US\$ 4.940/kWp, o investimento total seria de US\$ 197.600 e o custo de manutenção e operação anual seria de 1% do investimento. Pela dificuldade de obtenção de espaço físico, a premissa é que navios graneleiros, porta-contêineres, cargueiros e a categoria de outras embarcações não tenham geração de energia elétrica fotovoltaica. Esse sistema representaria redução de combustíveis fósseis para petroleiros e tanques químicos de 0,5%, gases liquefeitos de 0,2% e outras embarcações de 1,7% (BRASIL/EPE, 2012b; FABER et al., 2010).

Em termos de frota brasileira, a inserção de tecnologia avançada renovável tem aplicabilidade em 3% do quantitativo das embarcações com penetração de mercado da ordem de 10% desse montante, ou seja, o potencial estimado atual é muito pequeno. A Tabela 61 mostra o custo de investimento das referidas tecnologias avançadas em “bloco” para redução do consumo energético de uma embarcação típica, tendo em vista o perfil da frota hidroviária nacional.

Tabela 61 – Ganhos de Eficiência e Custos das Tecnologias Avançadas por Embarcação Típica

Faixa de Ganho (%)	Custo Mínimo (US\$)	Custo Máximo (US\$)
1,6 – 7,5	385.576	1.837.427

Fonte: BRASIL/ANTAQ, 2011a, 2013b; FABER et al., 2010

3.2.3 TRENS

O transporte ferroviário de alta velocidade desempenha papel relevante nos sistemas de transporte tendo em vista que reduz drasticamente o tempo de viagem, além de permitir ligação direta entre áreas centrais de maior urbanização (LEE et al., 2014; YIN; BERTOLINI; DUAN, 2014). A levitação magnética permite a construção de veículos mais leves, com menor poluição sonora e consumo energético, possibilidade de curvas de raios menores e rampas mais acentuadas, fatos que, somados, reduzem os gastos na implantação desse sistema, quando comparados com sistemas convencionais de roda-trilho (JAYAWANT, 1981). As técnicas de levitação magnética baseadas em efeito eletromagnético (*electro magnetic levitation* – EML) ou eletrodinâmico (*electro dynamic levitation* – EDL), estudadas principalmente pela Alemanha e pelo Japão há mais de 40 anos, só se tornam economicamente

interessantes para altas velocidades (>350 km/h) (SCHACH; JEHLE; NAUMANN, 2006). O método de levitação utilizando supercondutores (*superconducting magnetic levitation* – SML), por sua vez, encontra seu nicho de aplicação no transporte urbano de baixa velocidade e vem sendo estudado por Brasil, Alemanha e China.

3.2.3.1 LEVITAÇÃO ELETROMAGNÉTICA (EML)

A Figura 73 mostra a topologia utilizada em trens de levitação eletromagnética desenvolvido pela Transrapid International, que conta com uma linha de teste de 30 km de extensão na cidade de Emsland, na Alemanha (TRANSRAPID, 2014). O sistema de levitação é composto por eletromagnetos laterais que mantêm o veículo lateralmente estável no trilho e eletromagnetos na parte inferior do trem que mantêm o veículo levitando. Tanto a estabilidade lateral quanto a levitação são alcançadas devido à interação dos eletromagnetos com uma parte de material ferromagnético fixa no trilho.

O sistema de propulsão desse veículo é feito por um motor linear síncrono. Uma corrente alternada imposta no enrolamento do estator gera uma onda trafegante que leva o trem a entrar em movimento. A variação da frequência dessa onda faz com que o trem diminua ou aumente a velocidade, permitindo aceleração e frenagem do veículo.

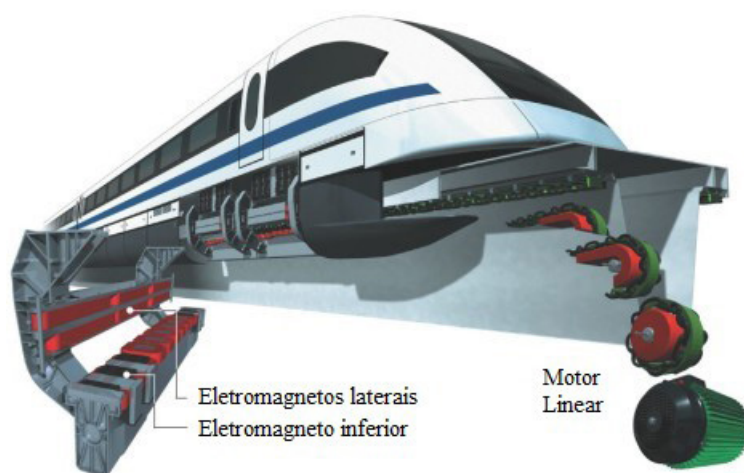


Figura 73 – Componentes do Sistema de Tração e Levitação do EML

Fonte: TRANSRAPID, 2014

A Transrapid International foi a primeira a utilizar esse tipo de levitação e teve sua versão comercial inaugurada na China (Figura 74), fazendo o trajeto entre o aeroporto de Pudong e o centro de Xangai (LUGUANG, 2006). Os veículos desse sistema podem operar em velocidades de até 430 km/h, percorrendo todo o trajeto de 30 km em oito minutos. Além da China, os EUA se mostraram como um importante mercado para implantação desse sistema de transporte. Em função de um programa de governo criado para incentivar o desenvolvimento dessa tecnologia no país, diversos projetos foram iniciados. Porém, devido à escassez de fundos, as atividades foram descontinuadas (TRANSRAPID, 2014). Para os veículos que operam em baixa velocidade, destacam-se os projetos em desenvolvimento e em fase de operação comercial na China, na Coreia (PARK; SHIN; HAN, 2009) e no Japão (YOSHIHIDE et al., 2003).



Figura 74 – Trem com Tecnologia EML em Operação – China

Fonte: TRANSPAPID, 2014

3.2.3.2 LEVITAÇÃO ELETRODINÂMICA (EDL)

Esse tipo de levitação teve sua aplicação pioneira no projeto do trem japonês, desenvolvido pela Japanese Railways (JR-MagLev) (JAPAN/RTRI, 2014), cuja topologia é apresentada na Figura 75. Nesse sistema, um trem com rodas se desloca sobre trilhos convencionais antes de começar a levantar. A lateral do veículo é cercada por um trilho lateral formado por bobinas de material condutor. Paralelamente ao trilho, corre a lateral do veículo, onde são instaladas bobinas supercondutoras responsáveis pela produção de um campo magnético intenso. Esse campo induz corrente nas bobinas condutoras do trilho lateral, gerando um campo magnético que se opõe à variação do campo magnético gerado pelas bobinas supercondutoras. A interação entre esses campos gera uma força repulsiva que faz o trem levantar. A velocidade necessária para que o trem comece a levantar é de aproximadamente 120 km/h.

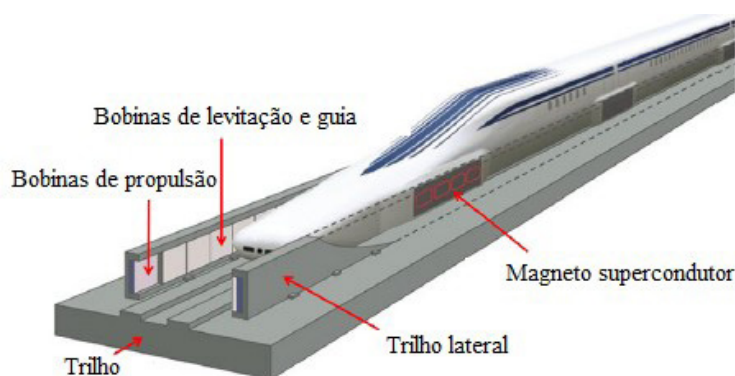


Figura 75 – Topologia da Tecnologia de Levitação EDL

Fonte: NISHIJIMA et al., 2013

Esse protótipo encontra-se em fase operacional em Yamanashi, no Japão (Figura 76), e conta com uma linha de 18,4 km com previsão de expansão para 42,8 km. A velocidade máxima atingida pelo protótipo foi de 581 km/h (NISHIJIMA et al., 2013).



Figura 76 – Trem de Levitação Eletrodinâmica – Japão

Fonte: NISHIJIMA et al., 2013

Diferentemente do sistema de levitação eletromagnética, a levitação eletrodinâmica permite uma sustentação estável e passiva. Porém, as complicações existentes em um sistema mecânico de rodas não são eliminadas. Os custos de implantação são bem altos e o consumo de energia, bastante elevado (SCHACH; JEHL; NAUMANN, 2006).

3.2.3.3 LEVITAÇÃO SUPERCONDUTORA (SML)

A levitação supercondutora se dá pela interação entre o campo magnético e o supercondutor. Devido às propriedades magnéticas intrínsecas desses materiais, é possível obter uma levitação altamente estável (HULL; MURAKAMI, 2004; MOON, 1994), tornando-se extremamente vantajosa quando comparada à levitação eletromagnética. Devido a essa característica, a utilização de um mecanismo de controle não se faz necessária. Com relação ao sistema eletrodinâmico, apesar de também apresentar estabilidade, a levitação só ocorre após o trem entrar em movimento. Tal fato não permite a ausência total do sistema roda-trilho convencional, o que não ocorre com a levitação supercondutora.

Atualmente, os únicos protótipos em desenvolvimento no mundo encontram-se em universidades e/ou centros de pesquisa do Brasil (SOTELO et al., 2014), da Alemanha (KUEHN et al., 2007) e da China (JIANG et al., 2012). No Brasil, essa tecnologia vem sendo estudada por grupos de pesquisa do Laboratório de Aplicações de Supercondutores (Lasup) da UFRJ, desde 1998. Em 2005, foi concluído um protótipo em escala reduzida que utiliza blocos supercondutores cerâmicos e ímãs permanentes para levitação. Atualmente, o protótipo encontra-se em fase operacional com uma linha de teste de seis metros de comprimento. A expansão desse sistema para uma linha de 200 metros está prevista para o final do ano de 2014 e fará a ligação entre dois prédios do centro de tecnologia da UFRJ, como apresentado na Figura 77.



Figura 77 – Linha Teste do Trem de Levitação Supercondutora – Brasil

Fonte: SOTELO et al., 2014

Um dos principais fatores responsáveis pela elevação do custo final de um sistema de levitação supercondutora é o trilho magnético, composto basicamente por blocos de ímãs. Devido a esse fator, a utilização desse tipo de veículo para longas distâncias torna-se inviável, restringindo sua utilização a distâncias mais curtas, como para o transporte urbano (STEPHAN; DE ANDRADE; FERREIRA, 2012).

3.3 ASPECTOS COMPORTAMENTAIS

A adoção de qualquer medida de mitigação, seja de tecnologias eficientes ou mudança modal, passa por questões comportamentais. Diversas barreiras, além da financeira, podem dificultar a implementação de tais medidas:

- Consumidores de automóveis: a adoção de veículos eficientes depende largamente do consumidor, e a sua escolha não é necessariamente racional. Há evidências empíricas de que poucos consumidores levam em conta o custo do ciclo de vida do veículo ao realizar uma compra (isto é, não é usual que se realize uma estimativa dos gastos com aquisição do veículo, manutenção, combustível etc. ao longo de sua vida útil) (GREENE, 2010a), o que pode ser desvantajoso para as tecnologias eficientes, pois não haveria valorização clara da economia de combustível. Existem barreiras associadas à demanda por veículos eficientes, como informação imperfeita, preço de combustível mantido artificialmente baixo, incerteza dos preços futuros de combustíveis (IEA, 2012c) e sobre a vida útil do veículo (IPCC, 2014), ou ainda, excesso de informação (IPCC, 2014). É interessante notar que os fabricantes de automóveis arcam com a maior parte do custo de desenvolvimento de tecnologias eficientes e que os consumidores usufruem de seus benefícios (sob a forma de menor gasto com combustível). Essa inversão de papéis é outro aspecto que dificulta a adoção de tecnologias eficientes (IEA, 2012c). Como a frota de automóveis é relativamente inerte – sua renovação se dá pelo sucateamento de veículos antigos e venda de novos –, a penetração de tecnologias eficientes pode levar alguns anos;

- Veículos *flex*: no caso brasileiro, merece destaque o aspecto comportamental inerente à utilização de veículos bicomcombustíveis. Com a introdução dos veículos *flex fuel* em 2003 – que permite que os veículos sejam abastecidos com etanol hidratado, gasolina C ou uma mistura de ambos –, o consumidor ganhou a opção de escolher o combustível no momento de abastecê-lo (BRASIL/EPE, 2013). Em 2013, cerca de 95% dos automóveis vendidos (ANFAVEA, 2015) e quase 60% da frota circulante eram *flex* (BRASIL/EPE, 2013). Em alguns casos, a escolha do consumidor é econômica: o combustível utilizado é decidido com base em uma suposta equivalência de 70% no valor pago por distância percorrida (R\$/km) entre o etanol e a gasolina; em outros, pesquisas indicam que a preocupação com o clima também pode influenciar a escolha do consumidor (BRASIL/EPE, 2013);
- Novas tecnologias e combustíveis: ainda que o consumidor brasileiro já esteja habituado ao veículo *flex*, a introdução de outros combustíveis e sistemas de propulsão, como veículos elétricos, pode ser dificultada devido à indisposição dos consumidores em comprar automóveis com características diferentes (menor autonomia, maiores custos, maior tempo de recarga/abastecimento) (IPCC, 2014);
- Eficiência veicular em condições reais: a eficiência de um veículo (representada, por exemplo, em km/l de combustível) medida em laboratório, considerando um ciclo de condução predeterminado, pode ser até 30% maior do que aquela que seria verificada na prática. Parte dessa diferença pode ser creditada a fatores como inadequações na metodologia de teste, qualidade das vias, comportamento do condutor, idade e estado de manutenção do veículo, congestionamentos e outros fatores (IPCC, 2014). *Eco-driving* é algo que merece destaque nesse ponto: cerca de 5% a 10% do consumo energético de veículos leves e 5% a 20% de veículos pesados podem ser poupados por meio da prática de direção econômica;
- Efeito bumerangue: menores custos de deslocamentos, como o acarretado por medidas de eficiência energética, incentivam justamente maior quantidade de deslocamentos, o que pode gerar maior consumo energético, a despeito das ações de eficiência. Tal fenômeno é comumente referido como “efeito bumerangue” (IPCC, 2014). A magnitude do efeito depende de diferentes fatores, mas tende a ser maior quando o custo do deslocamento (largamente associado ao preço do combustível) é uma parcela relevante da renda familiar. Formas de minimizar o efeito bumerangue incluem maior taxa de combustíveis e pedágios, de forma que compensem a redução do custo de deslocamento que seria obtida pela melhoria de eficiência (IPCC, 2014). O efeito também é verificável no nível empresarial, especialmente em empresas de transporte de cargas. Dado que a energia representa parte significativa dos custos operacionais de empresas do ramo logístico, essas empresas têm forte incentivo para reduzir sua intensidade energética, o que pode reduzir os custos de transporte. Caso a redução do custo de transporte seja repassada para o preço do transporte, pode haver um efeito bumerangue e aumentar a demanda do transporte de cargas (IPCC, 2014);
- Manutenção e afins: aspectos simples, como realizar manutenção adequada dos veículos, podem reduzir em média 4% o consumo de combustível do veículo (USA/ORNL, 2001). A correta limpeza dos bicos injetores de combustível, tanto em veículos leves quanto em veículos pesados, é um exemplo de ação desse tipo. Além disso, manter pneus com calibragem adequada pode reduzir em 3% a demanda energética (USA/ORNL, 2001). Essas medidas são aplicáveis não somente a usuários individuais, mas também a empresas de transporte que careçam de procedimentos de manutenção e calibragem sistemática;
- Mudança modal: a mudança modal, no transporte de passageiros e carga, oferece possibilidades promissoras para a redução da intensidade energética de deslocamentos. Conforme detalhado na seção 3.4, projetos como a instalação de um metrô, por exemplo, podem deslocar parte da demanda por transporte individual para o transporte público, que consome menor quantidade de energia por passageiro-quilômetro percorrido (IPCC, 2014). Contudo, a adoção de modais menos energointensivos não é um aspecto puramente comportamental, já que depende da oferta de infraestrutura de transporte adequada (o próprio metrô, no caso do exemplo sugerido), em muitos casos dependente de investimento público.

3.4 MUDANÇAS DE MODAL

3.4.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

Segundo dados da Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP), o transporte individualizado foi o meio utilizado em 30,9% das viagens³⁴ realizadas no Brasil em 2011, enquanto o transporte público foi responsável por 28,9% delas – as 40,2% restantes foram realizadas a pé ou por bicicleta (ANTP, 2014). Uma vez que, de acordo com os dados apresentados, o transporte individual prevalece sobre o transporte público, há potencial para substituição modal no setor de transporte de passageiros por meio de mudança para modais menos energointensivos ou até para maior uso de transporte não motorizado. Existem diferentes tecnologias que poderiam ser implementadas para tal, cada uma com suas peculiaridades e adequadas para um determinado serviço.

3.4.1.1 BUS RAPID TRANSIT (BRT)

O BRT (*bus rapid transit*) é um sistema de transporte de ônibus cuja principal característica é a provisão de infraestrutura segregada com prioridade de passagem, conforme ilustrado na Figura 78. O sistema apresenta características semelhantes às do transporte sobre trilhos, porém, em geral, a custos menores (BRASIL/MCIDADES, 2008).



Figura 78 – Exemplo de Sistema BRT

Fonte: BRASIL/MCIDADES, 2008

34 A “viagem”, conforme classificada pela ANTP, consiste no modo principal pelo qual ocorre um deslocamento (BRASIL/ANTP, 2014). Seguindo essa metodologia, em um deslocamento no qual uma pessoa caminha a pé para depois utilizar outro meio de transporte (e.g. metrô, ônibus) para percorrer a maior parte da distância, contabiliza-se toda a viagem como realizada pelo segundo meio de transporte.

Dentre os sistemas utilizados no transporte público, duas vantagens do BRT são o seu custo relativamente baixo e a sua flexibilidade operacional – o sistema pode transportar de 3.000 a 45.000 passageiros/hora em cada sentido. Para sistemas de maior capacidade, é fundamental que haja prioridade de passagem às vias segregadas (BRASIL/MCIDADES, 2008).

No Brasil, em 2008, havia aproximadamente 200 km de vias de BRT instaladas (BRASIL/MCIDADES, 2008), infraestrutura que tem sido alvo de investimentos devido a fatores como a publicação da Lei da Política Nacional de Mobilidade Urbana (Lei nº 12.587/2012) e o PAC Mobilidade Grandes Cidades (BRASIL/MT, 2013a). Com isso, novos sistemas têm sido instalados, como o BRT do Rio de Janeiro, TransOeste e Transcarioca, que adicionaram cerca de 100 km à malha brasileira. Tendo em vista os projetos atuais, estima-se a existência de 536 km de vias de BRT instaladas no Brasil até 2020 (BRASIL/MT, 2013a) – cabe destacar que havia cerca de 2.000 km de infraestrutura de BRT em operação ao redor do mundo em 2011 (IPCC, 2014).

Segundo o Ministério das Cidades (BRASIL/MCIDADES, 2008), com base em projetos de Curitiba, Porto Alegre e São Paulo, os custos do sistema BRT são da ordem de 1-3 milhões de US\$/km, enquanto o IPCC (2014) indica os custos na faixa de 5-28 milhões de US\$/km. As principais características de sistemas BRT são apresentadas na Tabela 62.

Tabela 62 – Características do Transporte por BRT

Custo de Capital (10⁶ US\$/km)	Consumo Específico (GJ/100 km)	Taxa de Ocupação (pass/veículo)	Capacidade (10³ pass/hora)
1-28	2,50	70-240	10-45

Fonte: Elaboração própria a partir de IPCC, 2014; BRASIL/MCIDADES, 2008; BRASIL/MT, 2013a

De acordo com Martins et al. (2010) e o Ministério dos Transportes (BRASIL/MT, 2013a), os usuários de um novo sistema de BRT migram, em sua maior parte, do transporte público por ônibus, representando aproximadamente 70% dos novos usuários. Por outro lado, apenas 5% a 20% dos motoristas migram de seus veículos particulares para o BRT (BRASIL/MCIDADES, 2008).

3.4.1.2 VEÍCULOS LEVES SOBRE TRILHOS (VLT)

A tecnologia de veículos leves sobre trilhos (VLT), ou *light rail transit* (LRT), é baseada em trens elétricos, seja com um único vagão ou com uma composição curta de veículos, geralmente em faixas exclusivas com direito de passagem. O transporte se dá no nível da superfície e é comum haver conexões elétricas sobre toda a extensão do trajeto percorrido pelo VLT, conforme pode ser observado na Figura 79. Bondes também podem ser considerados um tipo de VLT, porém é usual que estes utilizem carrocerias menores e dividam o espaço com outros tipos de tráfego (BRASIL/MCIDADES, 2008).



Figura 79 – Exemplo de Sistema VLT

Fonte: UFSC, 2014

Sistemas de VLT têm maior capacidade que ônibus convencionais e adaptam-se melhor a mudanças de trajetória que o metrô. Por outro lado, sua implementação é mais custosa que ônibus e sua capacidade é inferior à de metrôs enterrados. Outras vantagens do VLT são o seu desempenho silencioso e a boa imagem geralmente associada a esse tipo de sistema (BRASIL/MCIDADES, 2008).

De acordo com o Ministério das Cidades (BRASIL/MCIDADES, 2008), não havia, até o ano de 2008, nenhum sistema de VLT implantado no Brasil. Em 2013, foi inaugurado o de Porto Alegre, conectando o aeroporto ao sistema de metrô, e há planos de implementação de VLT na cidade do Rio de Janeiro. Ademais, o Ministério dos Transportes (BRASIL/MT, 2013a) prevê a construção de uma malha de VLT de, aproximadamente, 138 km de extensão até 2020, dos quais 125 km da infraestrutura de VLT são movidos a eletricidade e 13 km a diesel.

Mundialmente, os sistemas de VLT são mais difundidos que o BRT, com uma extensão viária de aproximadamente 15 mil km, apesar de terem capacidade de transporte inferior à do BRT. Segundo o IPCC (2014), a capacidade de transporte dos VLT oscila entre 2.000 a 12.000 passageiros por hora por sentido, enquanto o Ministério das Cidades (BRASIL/MCIDADES, 2008) indica que a capacidade do VLT de Túnis é de 13.400 passageiros por hora por sentido. A Tabela 63 resume os principais dados do transporte VLT.

Tabela 63 – Características do Transporte por VLT

Custo de Capital (10 ⁶ US\$/km)	Consumo Específico		Taxa de Ocupação (pass/veículo)	Capacidade (10 ³ pass/hora)
	Diesel (GJ/100 km)	Eletricidade (kWh/pkm)		
14-42	4,40	0,07-0,19	350	2-13

Fonte: Elaboração própria a partir de UK/DEFRA, 2013; IPCC, 2014; BRASIL/MCIDADES, 2008; BRASIL/MT, 2013a

O Ministério dos Transportes (BRASIL/MT, 2013a) adota os mesmos valores de mudança modal de BRT para novos projetos de VLT: 69% migram do transporte público por ônibus, 17% do transporte individual por automóvel e 14% de outros modais.

3.4.1.3 METRÔ

Metrô é um sistema de transporte público ferroviário pesado sobre trilhos exclusivos, geralmente enterrados, ou seja, abaixo do solo (BRASIL/MCIDADES, 2008), conforme exemplificado na Figura 80. Sistemas com diversas características já foram caracterizados como metrô, contudo esse meio de transporte apresenta três características fundamentais (UFSC, 2014): i) ser um sistema de transporte urbano elétrico; ii) ser independente do restante do tráfego (circulação geralmente subterrânea); iii) ser frequente (tempo de espera reduzido).



Figura 80 – Exemplo de Sistema de Metrô

Fonte: UFSC, 2014

Diversos benefícios são comumente associados ao metrô – redução do tempo de percurso, conforto e alta capacidade são alguns deles. Pesa contra esse sistema, porém, seu elevado custo de implantação e manutenção, que é justificável somente em rotas de alta densidade (UFSC, 2014).

Algumas metrópoles brasileiras, como São Paulo e Rio de Janeiro, já têm sistemas de metrô em funcionamento e, com os investimentos previstos, a infraestrutura brasileira desse modal alcançaria aproximadamente 195 km em 2020 (BRASIL/MT, 2013a), em contraste com os 10.000 km de malha existentes no mundo (IPCC, 2014). A Tabela 64 apresenta as características desse meio de transporte.

Tabela 64 – Características do Transporte por Metrô

Custo de Capital (10⁶ US\$/km)	Consumo Específico (kWh/pkm)	Capacidade (10³ pass/hora)
28-370	0,08-0,21	12-45

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de IPCC, 2014; BRASIL/MC, 2008; BRASIL/MT, 2013a

Segundo as premissas adotadas no Plano Setorial de Transporte e de Mobilidade Urbana para Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima (BRASIL/MT, 2013a), 76% dos usuários de metrô migram do transporte público por ônibus, 14% do transporte individual motorizado e 10% de outros modais.

Da mesma forma que os metrôs, trens urbanos são um sistema de transporte público ferroviário pesado sobre trilhos exclusivos, com as diferenças de que estão localizados principalmente a céu aberto e a carroceria de suas composições geralmente é mais pesada (BRASIL/MCIDADES, 2008). Dadas as similaridades com sistemas de metrô, suas características operacionais tendem a ser semelhantes. A principal diferença, contudo, está no custo de investimento, uma vez que não há necessidade de realização de escavações para a implementação de vias para trens. Por outro lado, custos imobiliários podem ser proibitivos em determinados trajetos.

3.4.1.4 TREM DE ALTA VELOCIDADE (TAV)

O trem de alta velocidade (TAV) é um sistema ferroviário utilizado no transporte de passageiros. Em geral, compreende linhas ferroviárias projetadas e construídas para trens capazes de desenvolver velocidades iguais ou superiores a 200 km/h. A implementação de um TAV é adequada, em substituição ao transporte aéreo, entre pares de cidades cuja distância situe-se na faixa de 500 km a 600 km (BRASIL/EPL, 2014c). Trata-se, portanto, de um meio de transporte intermunicipal, diferentemente dos sistemas urbanos apresentados anteriormente.

Se, por um lado, o TAV reduz o tempo de viagem se comparado ao transporte rodoviário, não necessariamente é mais rápido que o transporte aéreo. Porém, pode ajudar a reduzir gargalos do sistema aeroportuário e tem baixa probabilidade de atraso (BRASIL/EPL, 2014c). De modo a minimizar perdas energéticas devido à resistência do ar, TAV costuma ter formato aerodinâmico, como pode ser observado na Figura 81.



Figura 81 – Exemplo de TAV

Fonte: EURAIL, 2014

No Brasil, há um projeto de implementação desse sistema entre os municípios do Rio de Janeiro, São Paulo e Campinas, com extensão total de 511 km, dos quais 412 km estão entre Rio de Janeiro e São Paulo (HALCROW/SINERGIA, 2009). Contudo, a informação mais recente a respeito do projeto disponibilizada pela ANTT é de 2013 e trata do adiamento sem data do leilão de concessão do TAV (BRASIL/ANTT, 2013a). O valor final de investimento do TAV foi estimado em R\$ 34,63 bilhões em 2009 (BRASIL/ANTT, 2009). Experiências internacionais indicam uma faixa de custo de aproximadamente US\$ 11-64 por km (POURREZA, 2011).

Quanto à demanda, no estudo de baixo carbono, projetou-se uma demanda de aproximadamente 21 milhões de pkm para o TAV em 2030 (MARTINS et al., 2010). Vale ressaltar, porém, que um projeto de TAV incrementaria a demanda por viagens, não apenas promovendo substituição modal, mas também aumentando a quantidade total de viagens entre essas cidades (HALCROW/SINERGIA, 2009). Já o consumo energético, com base em TAV em operação na Europa, oscila de 0,029-0,041 kWh de energia elétrica por assento por km (NETWORK RAIL, 2009).

3.4.1.5 TRANSPORTE NÃO MOTORIZADO

O uso de transporte não motorizado, como a pé ou em ciclovias, oferece grandes oportunidades de economia de energia. Mundialmente, houve, ao longo do século XX, uma migração do transporte não motorizado para o transporte motorizado, seja por meio do transporte público ou do transporte individualizado. Em alguns países em desenvolvimento, tal mudança é de certa forma inevitável e, até certo ponto, desejável, pois pode refletir em crescimento econômico. Contudo, a mitigação das emissões de GEE e inovações como o compartilhamento de bicicletas e a difusão de bicicletas elétricas podem incentivar usuários a optar pelo transporte não motorizado (IPCC, 2014).



Figura 82 – Exemplo de Transporte Não Motorizado com Uso de Bicicletas

Fonte: CONVIVA, 2014

Políticas públicas simples, como a criação de infraestrutura adequada para a prática do ciclismo, podem influenciar a opção modal (IPCC, 2014). Não haveria grandes restrições de custos para o incentivo ao uso da bicicleta, uma vez que podem ser até irrisórios. Bushell et al. (2013), por exemplo, estimam que o custo de uma ciclovia pode variar de aproximadamente US\$ 3.000 a US\$ 300.000 por quilômetro de infraestrutura.

3.4.2 TRANSPORTE DE CARGA

Conforme discutido no item 1.2.2, o modal rodoviário, principal modo de transporte de carga no Brasil, deveria ser utilizado, preferencialmente, no transporte de bens de médio e alto valor agregado, em pequenas quantidades e curtas distâncias, dada a sua agilidade e flexibilidade na realização de entregas. No entanto, o que se observa no país é uma alta participação desse modal, com veículos percorrendo uma distância média de cerca de 70 mil km e, apesar de ser responsável pelo transporte de cerca de 87% dos produtos de alto valor agregado, movimenta principalmente produtos agrícolas e outros bens de menor valor.

Apesar de ter apresentado um crescimento de cerca de 26% no transporte de carga, o modal ferroviário ainda tem participação na matriz de transportes inferior ao esperado para o país, dada a grande extensão territorial brasileira e suas condições econômicas. Problemas como os diferentes tipos de bitola existentes na malha ferroviária, a sua transposição em áreas urbanas, os direitos de passagem de cada concessionária, a baixa quantidade de terminais de integração intermodal, dentre outros, inviabilizam o uso mais intenso das ferrovias brasileiras em longas distâncias, quando estas se tornam mais competitivas (NOVAES et al., 2006).

Cabe destacar que o modal rodoviário apresenta custos por quilômetro percorrido menos competitivos, em especial para longas distâncias, em face dos modos de baixo carbono, como ferroviário e hidroviário. A Tabela 65 apresenta os custos médios empregados para o transporte de carga no Brasil, contabilizando-se preço de combustível, manutenção, seguros, lubrificantes, força de trabalho, entre outros.

Tabela 65 – Comparação de Custos em Reais por Tonelada Transportada

Quilômetros Percorridos	Rodoviário	Ferroviário	Hidroviário (Navegação Interior)
	R\$ por Tonelada Transportada		
100	49,46	13,0	5,04
250	73,42	25,5	9,50
500	113,36	43,0	16,94
1000	193,23	72,0	31,81
2000	353,31	120,0	61,56

Fonte: BRASIL/MT, 2013b

Tal fato se deve, em grande parte, à falta de elasticidade estrutural, que restringe trajetos mais curtos no transporte de carga à rede de estradas devido à maior densidade da rede. Somam-se a isso as mudanças na indústria e no *mix* de *commodities*, as quais são muitas vezes reforçadas por taxas diferenciais que normalmente favorecem o transporte rodoviário na melhoria da infraestrutura do setor de transporte de carga. De fato, ao longo das últimas décadas, os modais aéreo e rodoviário apresentaram aumento da sua participação no transporte de carga global, em detrimento do transporte ferroviário e aquaviário (IPCC, 2014).

Se o crescimento de 70% projetado das viagens de caminhão mundial entre 2010 e 2050 pudesse ser cortado pela metade e transferido para ferrovias, poderia ser alcançada uma economia de cerca de 20% na demanda por combustível e emissão de CO₂, com cerca de apenas um quinto dessa redução sendo compensada pelo aumento do uso de energia pelo modal ferroviário (IPCC, 2014).

Contudo, induzir essa reversão significativa no transporte de carga é uma tarefa complexa. O potencial do transporte de mercadorias para modais mais ecoeficientes se torna difícil em áreas urbanas. Vias ferroviárias nessas áreas são viáveis, porém o sistema logístico da cidade é quase que totalmente dependente de veículos rodoviários. Mais do que isso, com o rápido crescimento do varejo *on-line*, a tendência é de que muitos produtos sejam transportados pelos chamados veículos leves comerciais (IPCC, 2014).

As oportunidades para a mudança de serviços de frete aéreo para o transporte aquaviário são limitadas no nível internacional. Ambos os mercados são relativamente discretos e os bens com os quais lidam apresentam valor agregado e sensibilidade ao tempo de entrega muito distintos. A desaceleração de navios porta-contentores de águas profundas nos últimos anos, de acordo com as políticas de redução de velocidade das linhas marítimas, ampliou ainda mais a lacuna entre os tempos de transporte por mar e ar. Aumentos futuros do custo do combustível podem, no entanto,

incentivar uma economia no uso do transporte de carga aéreo, possivelmente migrando para serviços integrados entre mar e ar, em que os produtos são transportados por vias aéreas em apenas parte do caminho. Essa fusão oferece às empresas redução substancial nos custos e nas emissões de CO₂ para as empresas, e cadeias de suprimento são menos sensíveis ao tempo de entrega (IPCC, 2014).

De fato, a economia de escala do transporte hidroviário implica custos logísticos menores em comparação com os modais rodoviário e ferroviário, refletindo, respectivamente, em até 62% e 40% na redução de despesas com frete (BRASIL/SPNT, 2012). Tanto para cabotagem quanto para navegação interior, usualmente, se fazem comparativos desse ganho na forma da quantidade de vagões ou caminhões para se igualar uma embarcação de grande porte, conforme pode ser observado na Figura 83.

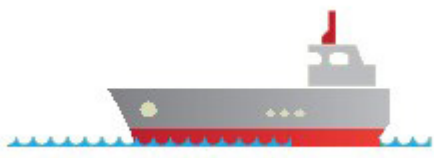
	Uma embarcação de 5.000 toneladas
	72 vagões de 70 toneladas cada
	143 caminhões de 35 toneladas cada

Figura 83 – Equivalência de Capacidade de Carga Transportada entre os Modais

Fonte: CNT, 2013a

No consumo de combustível, o transporte hidroviário tem a menor relação de consumo por tonelada-quilômetro útil transportada. De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2013a), o transporte rodoviário apresenta consumo de energia (medido em diesel por mil TKU) 3,75 vezes superior ao consumo do transporte realizado no modal hidroviário, o que pode ser observado na Figura 84.

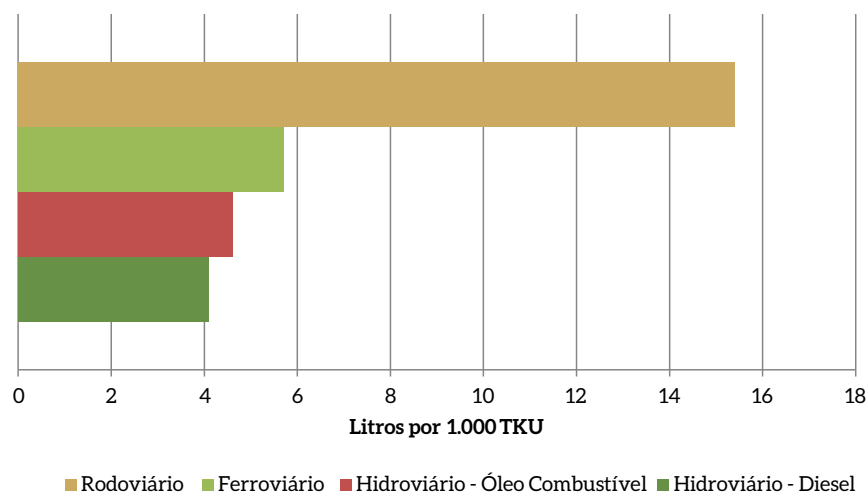


Figura 84 – Consumo de Combustível por 1.000 Toneladas-Quilômetro Útil Transportadas

Fonte: CNT, 2013a

Atualmente, no país, o principal plano de metas e previsão para o setor de transportes é o Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT), elaborado pela Secretaria de Política Nacional de Transportes (SPNT), do Ministério dos Transportes (MT). O PNLT objetiva orientar, com embasamento técnico e científico, a implantação das ações públicas e privadas no setor de transportes de forma a atender às demandas políticas de integração, desenvolvimento e superação de desigualdades (BRASIL/SPNT, 2012). Dessa forma, é um plano de otimização do setor, visando a uma transformação na matriz que apresente participações mais equilibradas dos modais.

O PNLT foi lançado em 2007, com projeções muito otimistas para o transporte de carga no Brasil, prevendo equiparação entre os modais rodoviário, ferroviário e aquaviário. O relatório revisado foi divulgado em 2012 e traz como base o ano de 2011. O principal resultado dessa revisão das metas estabelecidas no PNLT é a atualização do portfólio de investimentos.

Para a construção desse portfólio, foram levantados mais de mil projetos. Removidas todas as duplicidades e intervenções passíveis de serem agrupadas em um único projeto, o resultado foi uma listagem de 1.167 projetos. Nesses projetos, estão compreendidos os pleitos registrados junto à SPNT, projetos não implementados em versões anteriores do PNLT e a relação dos projetos de empreendimentos de infraestrutura regional de transportes constantes do PAC.

Porém, nem todos esses 1.167 projetos tinham passado por uma análise que comprovasse sua viabilidade ou definisse prioridade de aplicação de investimentos. Foram, então, realizados estudos macroeconômicos e de demanda de transportes (incluindo transporte de carga e de passageiros) para identificação dos principais fluxos de origem-destino entre todas as regiões, além de estudos de oferta para levantamento da atual rede de transportes existente no país. Após esses estudos, foram realizadas simulações de impacto das demandas futuras na rede viária multimodal – por meio da identificação de produtos relevantes na demanda por transporte –, obtendo-se estimativas dos carregamentos ou fluxos por segmento viário para diferentes anos futuros. Esse processo resultou em um diagnóstico da situação inicial (contemplando a matriz de transporte de carga de 2011) e uma visão preliminar do futuro projetado e desejado.

Dessa forma, considerando a implementação dos projetos simulados pelo PNLT, os quais contemplam obras do PAC, projetos prioritários e sociopolíticos, o plano foi capaz de projetar qual seria a divisão modal no transporte de carga ao longo do horizonte de tempo, como apresentado na Tabela 66.

Tabela 66 – Participações Previstas pelo PNLT no Transporte de Carga

Ano	Rodoviário	Ferroviário	Hidroviário	Dutoviário	Cabotagem
2015	44%	36%	6%	7%	7%
2019	40%	40%	6%	6%	8%
2023	39%	42%	6%	4%	9%
2027	38%	43%	6%	4%	9%
2031	38%	43%	6%	4%	9%

Fonte: BRASIL/SPNT, 2012

Como se pode verificar, segundo o PNLT, os investimentos previstos para o setor provocarão aumento significativo da participação do modal ferroviário, ultrapassando o rodoviário como principal modo de transporte de carga.

3.5 OUTRAS MEDIDAS

3.5.1 MELHORIAS DE INFRAESTRUTURA

No caso específico dos veículos rodoviários, as condições gerais da via sobre a qual os veículos trafegam apresentam influência direta sobre o consumo específico dos veículos, tanto leves quanto pesados. A mitigação do impacto gerado pela via sobre o consumo pode ser dado de três formas principais: redução dos congestionamentos, suavização do tráfego, ou seja, diminuição das oscilações de velocidade durante a condução, e redução das velocidades médias de viagens, além da melhoria das condições físicas da via (IEA, 2012b).

O congestionamento é uma redução de velocidade causada por um trânsito pesado em que a quantidade de carros é maior do que a capacidade de tráfego daquela via em um instante de tempo. O congestionamento gera aumento no consumo de combustível não só pelo tempo em que o veículo fica parado ou em velocidade reduzida adicionando tempo de operação do motor, mas também pelo aumento de partidas e paradas do veículo, que o tornam ainda mais ineficiente. Como foi descrito no item 3.1.1.4, alguns equipamentos auxiliares podem ser incluídos no veículo, leve ou pesado, para que haja redução do consumo. Entretanto, tais métodos não atacam a raiz principal do problema: o congestionamento em si.

Congestionamentos têm grande impacto em áreas urbanas, onde há maior concentração de veículos em determinados horários. De acordo com o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (BRASIL/INMETRO, 2014a), as eficiências veiculares medidas em um ciclo urbano (que busca simular as características de trânsito em uma cidade) são, em média, 80% da eficiência medida em um ciclo rodoviário (na estrada).

Os problemas de congestionamento, no caso dos Estados Unidos, por exemplo, são causados pela quantidade de carros que excede a capacidade da via em 50% dos casos (CANADA/NRC, 2010). Os demais casos são: acidentes de trânsito (25%), áreas de trabalho (15%), mau tempo (10%) e temporização ruim dos sinais de trânsito (5%) (CANADA/NRC, 2010). Percebe-se, então, que, em 90% dos casos, à exceção do mau tempo, há alguma possibilidade de executar ações mitigatórias, seja em ações de incentivo à redução de veículos em horários de pico, gestão de acidentes ou temporização de sinais. Tais ações tendem a reduzir a emissão de CO₂ como consequência da redução de consumo de combustível.

Em simulações utilizando parâmetros genéricos e diferentes cenários de tráfego, Coensel e Botteldooren (2011) concluíram que a otimização dos intervalos de tempo ditados por sinais de trânsito pode reduzir a emissão de poluentes (CO₂ incluído), em uma via em particular, de 10% a 40%. Otimizações desse gênero podem ser realizadas por meio de estudos que analisem as condições de tráfego e avaliem a melhor forma de coordenar o fluxo de trânsito.

Outra forma de otimizar os intervalos de sinais é por meio de sistemas de informação em tempo real, como o programa Real-Time Information Synthesis (AERIS), proposto pelo Departamento de Transporte Norte-Americano. O programa consiste, de forma simplificada, em um sistema de coordenação do fluxo de tráfego com os sinais de trânsito, de modo a reduzir o número e o tempo de paradas realizadas pelos veículos e evitar, assim, acelerações e desacelerações desnecessárias. Para otimizar os intervalos dos sinais de trânsito, uma certa quantidade de veículos em circulação deve estar conectada ao sistema (por meio de uma rede sem fio entre os veículos e equipamentos na beira da estrada). Esses veículos fornecem dados (como localização e velocidade) em tempo real ao sistema para que, por meio de um algoritmo, sejam ajustados os intervalos dos sinais de trânsito com o intuito de reduzir o congestionamento (conforme ilustrado simplificadaamente na Figura 85). Por meio de um sistema desse tipo, seria possível obter reduções no consumo de combustível da ordem de 5% a 20% (USA/DOT, 2013).

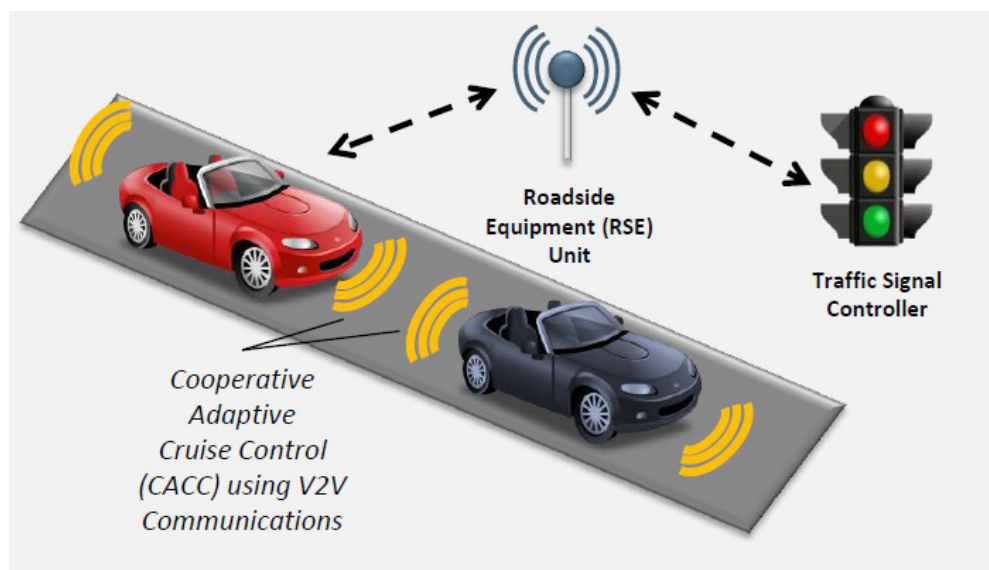


Figura 85 – Ilustração do Sistema AERIS

Fonte: USA/DOT, 2013

Cabe destacar que, assim como as baixas velocidades (como as geradas pelos congestionamentos) geram aumento na emissão de CO₂, o aumento da velocidade desenvolvida pelo veículo também o gera. De fato, como demonstrado na Figura 86, há um limite ótimo para que haja emissão reduzida de CO₂, consequente da redução de consumo de combustível.

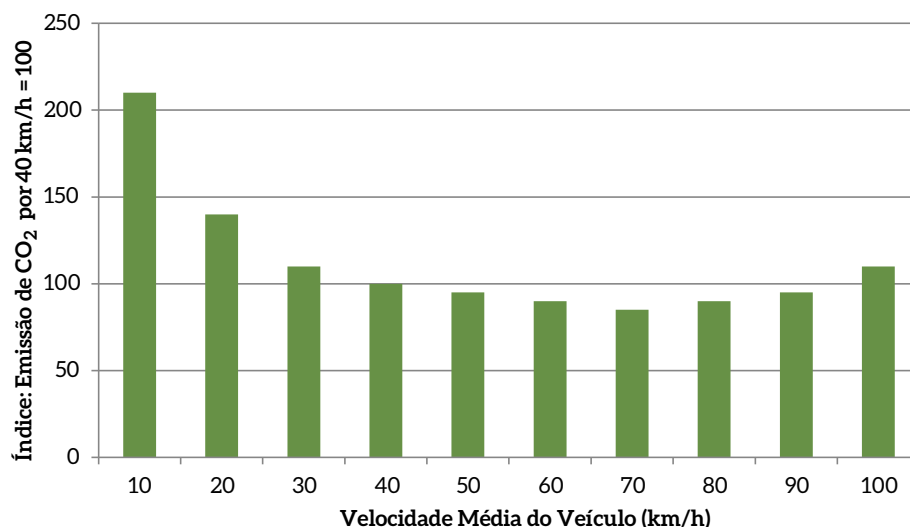


Figura 86 – Impacto da Velocidade do Veículo na Emissão de CO₂

Fonte: JAMA, 2008

No caso de locais de alta velocidade, a alteração da geometria da via pode gerar redução de velocidade, mas com adição de outros problemas como o aumento do risco na condução (CNT, 2014). Assim, soluções de redução de velocidades excessivas estão centradas no viés tecnológico, como limitadores de velocidade adaptativos inseridos nos veículos ou em atuação intensificada da polícia, coibindo excessos de velocidade. Ambas as soluções têm sempre o enfoque de aumentar a segurança na direção, mas geram ganhos no consumo de combustíveis.

Outro aspecto relevante diz respeito às condições gerais da via sobre a qual os veículos trafegam, que apresentam influência direta sobre o consumo específico dos veículos, tanto leves quanto pesados. Ou seja, a melhoria das vias de circulação, com a redução das perdas geradas pelo contato entre pneus e via, tem influência direta sobre a resistência gerada no veículo e o consequente consumo de combustível.

De forma básica, o pavimento que compõe uma via deve, além de permitir um deslocamento suave dos veículos, resistir ao fluxo desses veículos, suportar mudanças de clima, ter estrutura forte, permitir escoamento de água e ter boa resistência a derrapagens, sem causar grande desgaste de pneus nem gerar altos ruídos (BRASIL/DNIT, 2010). Dessa forma, a escolha do tipo de pavimentação de uma via segue, portanto, outros critérios além do consumo de combustível de um veículo. Contudo, de acordo com a Agência Internacional de energia (IEA, 2012b), estudos conduzidos na Suécia, na Holanda e nos Estados Unidos indicam que as superfícies mais suaves podem melhorar a eficiência energética dos veículos rodoviários de 5% a 10%.

Mais do que isso, especificamente para o Brasil, há a degradação do pavimento, fruto do desgaste natural ou de manutenção incorreta da via. Ou seja, a qualidade das vias acaba tendo impacto maior do que o tipo de pavimento utilizado em sua construção. A perda de eficiência dos veículos devido ao estado de desgaste das vias é bastante difícil de obter, principalmente pelo fato de ser complicada a separação desse efeito dos demais no momento da medição. De acordo com Bartholomeu e Caixeta Filho (2009), por meio de medições com alguns veículos em trajetos selecionados, os ganhos energéticos entre vias com boa manutenção e vias com desgaste elevado são de 5%. Além disso, a via em más condições gera aumento direto no custo do transporte devido ao aumento da quantidade de peças e veículos danificados.

3.5.2 BIOCOMBUSTÍVEIS

O uso de combustíveis alternativos tem sido uma constante em todo o mundo. Seja como incentivo à redução de emissões, seja pelas economias de divisas geradas, muitos programas de uso de biocombustíveis têm sido utilizados. De fato, os biocombustíveis criam uma forma de alteração da matriz energética, inserindo combustíveis com baixa emissão de carbono, normalmente com baixa mudança nos veículos existentes no mercado e na infraestrutura de distribuição (IEA, 2011b). O Quadro 4 mostra como é a atuação dos países no tocante às principais tecnologias.

Quadro 4 – Critério Atual da Mistura dos Bicomcombustíveis por País

País	Proporção de Biocombustível
Argentina	E5 e B10
Austrália	E4 e B2 em New South Wales; E5 em Queensland
Bélgica	E4 e B4
Brasil	E27, E25 e B7*
Canadá	Nacional: E5 e B2 Provincial: E5 e B4 em British Columbia; E5 e B2 em Alberta; E7,5 e B2 em Saskatchewan; E8,5 e B2 em Manitoba; E5 em Ontário
China	E10 em nove províncias
Colômbia	E8
Costa Rica	E7 e B20
Equador	B5
Paraguai	E24 e B1
Peru	B2 e E7,8
África do Sul	E2 e E5
Coreia do Sul	B2,5
Ucrânia	E5
Estados Unidos	Nacional: Mistura de 136 bilhões de litros de combustível renovável aos combustíveis usados no setor de transportes (até 2022). Estadual: E10 em Missouri e Montana; E10 no Havaí; E2 e B2 em Louisiana; B5 em Massachusetts; E10 e B10 em Minnesota; B5 no Novo México; E10 e B5 no Oregon; E2 e B5 em Washington
Uruguai	B5 e E5

Nota: B = biodiesel (B2 = 2% de mistura de biodiesel); E = etanol (E2 = 2% de mistura de etanol anidro à gasolina); O Brasil, atualmente faz uso do B7, mistura que será elevada para B8 em março de 2017; Atualmente, a mistura é de 27% de anidro à gasolina comum e 25% à gasolina premium.

Fonte: REN21, 2014

Como visto no Quadro 4, os biocombustíveis são centrados principalmente no etanol, substituto direto da gasolina, e no biodiesel, substituto direto do diesel. Além desses, há o biogás, substituto do gás natural, e mais recentemente o bioquerosene, substituto direto do querosene de aviação (QAV).

A cada um desses combustíveis corresponde, inerente a si, uma linha tecnológica própria para sua produção. Aquele cujo método de produção já tem tecnologia consolidada denomina-se de biocombustível de primeira geração. Biocombustíveis com tecnologias diferentes das convencionais, que despontam para a viabilidade técnico-econômica, são biocombustíveis de segunda geração.

O etanol pode ser feito de qualquer fonte de açúcar, sendo mais usuais a cana-de-açúcar (como o caso brasileiro), a beterraba e o milho. Sua tecnologia de produção já era utilizada para a produção de combustível antes do século XIX. A base dessa produção é a extração do açúcar por processos mecânicos e posterior fermentação. O grande avanço da tecnologia de segunda geração do etanol é a capacidade de extração do açúcar de materiais celulósicos (palha da cana, por exemplo) por processos químicos. O açúcar extraído segue o mesmo processo de produção do etanol da primeira geração.

O biodiesel é feito do óleo extraído de algumas oleaginosas, como soja, canola e palma, e também de gordura animal. Esses óleos e gordura são transformados em biodiesel com o uso de metanol ou etanol. Para a segunda geração, tanto a produção de biodiesel quanto a de bioquerosene dispõem de processos possíveis. Atualmente, existem três tipos de rotas tecnológicas: Fischer-Tropsch (FT), com o combustível sendo produzido por meio da gaseificação de biomassa em alta temperatura; óleos vegetais hidrogenados (HVO); e bio-óleo hidrotratado (HPO) a partir da pirólise de biomassa. A Figura 87 mostra o percentual de redução de emissão de GEE dos diferentes biocombustíveis em relação aos combustíveis convencionais.

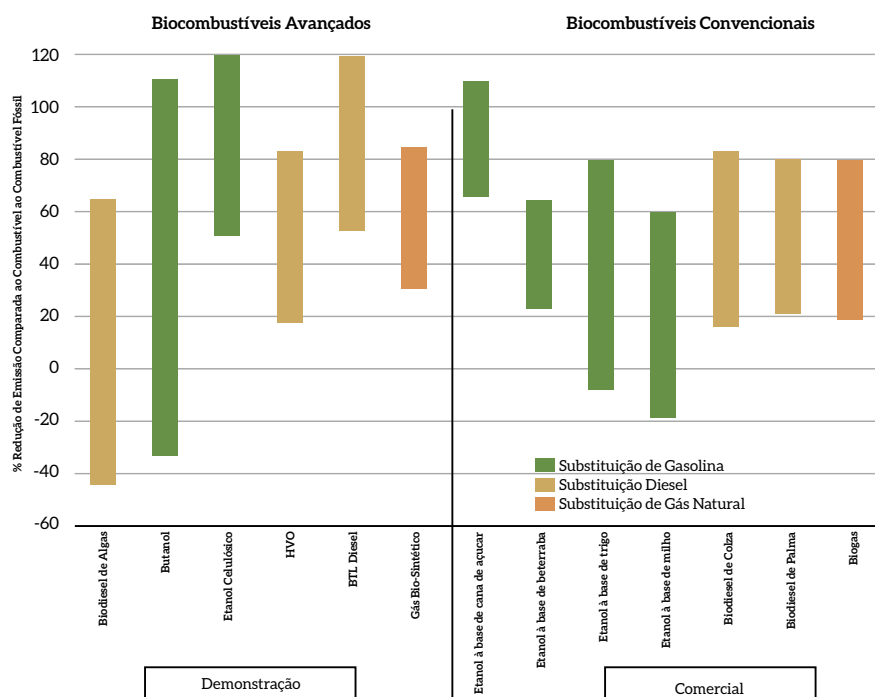


Figura 87 – Variação do Ciclo de Vida dos Gases de Efeito Estufa entre Diferentes Biocombustíveis

Nota: HVO – Hidrogenação de óleos Vegetais; BTL – Biomass to liquids

Fonte: IEA, 2011b

A inserção de boa parte desses combustíveis alternativos, entretanto, depende ainda de políticas específicas para sua inserção no mercado. Seja por causa dos ganhos de escala, pelo custo de produção ou pelo fato de as externalidades geradas, em especial as ambientais, não serem corretamente computadas, o fato é que o custo dos biocombustíveis, em sua maioria, é mais alto que o seu equivalente fóssil, quando não há incentivos.

É importante salientar que a substituição gradativa dos biocombustíveis depende diretamente da capacidade de produção e da disputa pelo espaço e pela terra (IEA, 2011b). Além disso, há limitação técnica para cada uma das tecnologias utilizadas, e sua substituição em alguns casos não se dá em 100% do combustível fóssil equivalente.

No caso do setor hidroviário, a ANP não permite mistura de biodiesel superior a 0,1% com os combustíveis marítimos devido à segurança e às condições técnico-operacionais limitantes, de acordo com a orientação da norma técnica internacional ISO 8217 (*Fuel Standard for Marine Distillate Fuels*). No entanto, a agência reguladora não exclui a possibilidade de permitir a mistura em maior percentual, caso haja evolução tecnológica no futuro e preservação da competitividade do setor hidroviário (BRASIL/ANP, 2010). Entretanto, existem outras opções relacionadas com a substituição dos combustíveis, como a utilização de combustíveis sintéticos, a partir do carvão ou da biomassa, por exemplo, sendo possível fazer um *blend* com o combustível principal, o que depende de regulamentação e/ou legislação específica, ou o uso de gás natural liquefeito (GNL), que esbarra em disponibilidade e armazenagem para as embarcações que não transportam esse tipo de combustível ou que têm propósito não petrolífero (MCCOLLUM; GOULD; GREENE, 2009; VERGARA; MCKESSON; WALCZAK, 2012; WARTSILA, 2010). Há também a opção do uso de energia termonuclear, cuja aplicação é restrita e depende de aprovação de vários países, apesar do uso militar em alguns países e casos pontuais na Rússia, na década de 1970 (VERGARA; MCKESSON; WALCZAK, 2012).

3.5.3 MEDIDAS OPERACIONAIS

3.5.3.1 EMBARCAÇÕES

Em face da dificuldade de realizar *retrofit*³⁵ das embarcações ou de sobreinvestimento em novos veículos equipados com tecnologias e recursos para alcançar menor consumo de combustível, algumas ações de caráter operacional podem trazer resultados significativos e imediatos. Dentre elas, destacam-se redução de velocidade, melhor planejamento da rota baseada na previsão climática, logística portuária e gerenciamento da frota, com as duas primeiras sendo as ações de maior relevância para diminuição do consumo energético (KOLIEB; SAVITZ, 2010). Em virtude de a potência exigida pelo sistema de propulsão estar relacionada à terceira potência com a velocidade, qualquer redução da velocidade propicia ganho energético significativo. Isso significa, por exemplo, que redução de 10% da velocidade representa cerca de 55% da potência do motor e 27% de redução de consumo de combustível, conforme a Tabela 67.

35 Processo de modernização das embarcações existentes.

Tabela 67 – Relação de Velocidade, Potência do Motor e Consumo de Combustível

Velocidade	Potência exigida pelo sistema de propulsão (%)	Consumo de combustível (%)
100%	75%	100%
90%	55%	73%
80%	38%	52%
70%	26%	35%

Fonte: FABER et al., 2010

Contudo, a economia de combustível alcançada pelo setor e a consequente redução de emissões têm como premissa a inserção de novos veículos hidroviários para compensar a maior morosidade na entrega, isto é, os compradores das mercadorias transportadas também aceitariam a ocorrência do frete em maior tempo, mas haveria a necessidade de novas embarcações para cumprimento da demanda. Outra observação importante é que o motor do sistema de propulsão não pode operar com qualquer fator de carga sem ajustes, dependendo de suas características de projeto para definição da carga mínima suportável (FABER et al., 2010).

A Tabela 68 indica os ganhos energéticos para uma embarcação típica nacional, bem como seus custos de investimento e operacionais anuais. Os custos são referentes às novas embarcações adicionais para atendimento da demanda.

Tabela 68 – Ganho Energético e Custos da Redução de Velocidade por Embarcação Típica

Ação	Ganho Energético (%)	Custo de novas embarcações (10 ⁶ U\$S)	Custo operacional anual (10 ⁶ U\$S)
Velocidade reduzida entre 10% e 20%	19% a 36%	36 – 38	1.400 – 1.700

Fonte: Elaboração própria a partir de BRASIL/ANTAQ, 2011a, 2013b; FABER et al., 2010

Outra ação que pode ser realizada é o planejamento da rota com base na previsão meteorológica. Além da questão meteorológica, as correntes marítimas são analisadas. Tal medida já é executada por uma parcela significativa da frota mundial e pode trazer economia de 0,1% a 0,4%, com custos entre US\$ 800 e US\$ 1.600 anuais.

3.5.3.2 AERONAVES

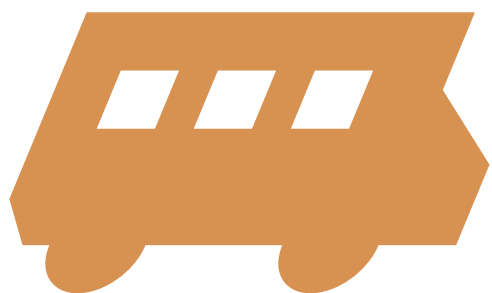
Desde 1996, o Brasil utiliza o sistema de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo (GFTA), que, mediante o emprego de métodos computacionais de tratamento de informações, orienta com grande precisão as operações aeronáuticas realizadas no Brasil, induzindo, assim, maior eficiência do uso do QAV. Nesse sentido, um aspecto importante do GFTA é a geração de dados relativos à altitude ideal de voo (sob o prisma da otimização do consumo de combustível). Além da economia de combustível e da consequente redução nas emissões de CO₂, o GFTA tem outros objetivos, como a minimização de atrasos, a redução do tempo de espera e o aumento da segurança dos voos (SIMÕES, 2003).

Segundo o Air Transport Action Group (ATAG, 2010), a implementação de um sistema de gerenciamento de tráfego aéreo global é complexo, porém viável. Embora seja algo simples de ser realizado no espaço aéreo de um único país, as adaptações também precisam ser difundidas por todo o espaço aéreo global. O primeiro problema será superar o desafio político de soberania a partir da construção de um sistema de gerenciamento de tráfego aéreo internacional ou regionalizado, para além das fronteiras nacionais. Atualmente, na Europa, cerca de 70% dos voos estão concentrados em 14% do espaço aéreo disponível.

Em termos de ganhos de eficiência na rota horizontal da aeronave, o relatório de desempenho do controle de tráfego aéreo europeu estima que, durante o ano de 2007, a distância real percorrida por cada aeronave era 49 km superior à sua trajetória ótima. Em termos de custos e emissões de GEE, foi estimado que a redução de 4 km por voo resultaria em economia de aproximadamente € 200-250 milhões por ano e redução anual de 120 mil toneladas de CO₂ (RAPER, 2009).

É importante frisar que uma parcela do volume de combustível economizado por meio de sistemas de gerenciamento de tráfego avançado será capturada, em certa medida, pela maior demanda causada pelas próprias melhorias de eficiência operacional realizadas (voos mais curtos, menores atrasos, passagens mais baratas). Isso é semelhante ao que é normalmente observado quando a capacidade de uma rodovia é ampliada pela adição de mais faixas de rodagem (MCCOLLUM; GOULD; GREENE, 2009). Na União Europeia, por exemplo, metade dos benefícios da iniciativa do programa europeu de gerenciamento de tráfego aéreo será compensada por um aumento na demanda (FABER et al., 2008). O benefício líquido esperado quanto à redução de consumo de combustível em função da adoção de sistemas de gerenciamento de tráfego avançado em 2050 seria de 5% (MCCOLLUM; GOULD; GREENE, 2009).

Outro fator de melhoria dos níveis de eficiência em termos de combustível tem sido o trabalho realizado pelas companhias aéreas para aperfeiçoar sua própria rede de operações, incluindo o código de compartilhamento de parcerias com outras companhias aéreas, que permitem mais utilização de aeronaves maiores, com mais passageiros. Novas técnicas de gestão de rendimento também podem aumentar o número de passageiros por voo e, portanto, a eficiência do combustível por cada assento ofertado. Além disso, tem havido grandes melhorias na eficiência do combustível com o desenvolvimento de ferramentas sofisticadas de planejamento e gestão de voo. Estas permitem que os pilotos explorem as condições de vento predominantes, realizem cálculo de cargas de combustível de maneira mais precisa, aloquem diferentes níveis e velocidades para a aeronave atingir o melhor desempenho econômico e determinem o centro exato de gravidade da aeronave, uma vez que se torna mais leve em voo – colocando o peso um pouco mais na parte de trás da aeronave ao invés de na frente. De acordo com o Air Transport Action Group (ATAG, 2010), essas medidas conjugadas podem reduzir o consumo de combustível de uma aeronave em até 0,5%, além disso grande parte das alterações praticamente não reflete em custos para as companhias aéreas e podem ser implementadas nas aeronaves em serviço.



Metodologia para projeção do consumo de energia e emissões de GEE do setor de transportes

Capítulo

4

4 METODOLOGIA PARA PROJEÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE GEE DO SETOR DE TRANSPORTES

Os modelos de projeção de demanda de energia e emissões para o setor de transportes assumem grande relevância devido às suas aplicações no planejamento de sistemas energéticos, que, por sua vez, têm provido informações essenciais para a avaliação de políticas existentes e formulação de novas políticas públicas nas áreas de energia e meio ambiente.

É importante destacar que as projeções de demanda energética apresentam elevado grau de complexidade (ALMEIDA, 2006) por estarem sujeitas a diferentes variáveis, em contínua transformação. Como consequência, muitos dos eventos relacionados são incertos, decorrentes da interação de múltiplas causalidades que variam no tempo, não podendo ser previstos com precisão.

Portanto, a análise do setor de transportes pode ser feita isoladamente, utilizando-se modelos setoriais ou, de forma global, com modelos de análise de demanda ou com modelos integrados. Evidentemente, a determinação de qual modelo utilizar varia de acordo com o interesse de cada analista, instituição, órgão ou empresa.

Nesta etapa do estudo, é desenvolvido um modelo *bottom-up* setorial de projeção de demanda de energia e emissões de GEE, desagregado em carga e passageiro e por tipo de modal – rodoviário, ferroviário, aéreo e hidroviário – para a análise do setor de transportes nacional no horizonte 2050. Os dados de saída da modelagem servirão de base para a modelagem integrada a ser realizada em etapa futura desse projeto. Segundo Bajay (2004), os modelos setoriais podem ser classificados como econométricos, técnico-econômicos ou mistos, cuja principal diferença é o grau de agregação do modelo.

Até o início da década de 1970, os modelos setoriais para estudo do comportamento da demanda energética eram modelos econométricos bastantes simplificados (BAJAY, 2004; JANNUZZI; SWISHER, 1997). Esses modelos são mais agregados e têm uma abordagem conhecida como descendente (*top-down*) que relaciona a demanda energética com indicadores macroeconômicos agregados como o PIB e os preços dos combustíveis. Ou seja, a modelagem *top-down* descreve o sistema energético de forma mais agregada, desconsiderando mudanças tecnológicas. Desse modo, as projeções dos modelos econométricos indicam, geralmente, crescimentos expressivos da demanda energética, pois não incorporam possíveis mudanças qualitativas na economia, o que leva a planos de grande expansão da capacidade de oferta de energia.

A utilização dos modelos econométricos era evidenciada pela lógica relativamente simples do planejamento energético naquela época: o atendimento da demanda a um mínimo custo (COSTA, 2001), não sendo contemplado, até então, nenhum aspecto de ordem social ou ambiental relacionado com a implementação de alternativas de suprimento.

Porém, os choques dos preços do petróleo em 1973 e 1979 e, mais recentemente, as preocupações com os impactos ambientais da indústria de energia provocaram mudanças na modelagem de sistemas energéticos cujo objetivo era adequá-los mais satisfatoriamente às principais tendências de evolução do mercado para a realização de planos de expansão.

Como consequência, a projeção da demanda de energia passou a ser feita com modelos técnico-econômicos que apresentam abordagem ascendente (*bottom-up*) mais desagregada, que realizam a modelagem partindo da demanda em relação à oferta (BAJAY, 2004; JANNUZZI; SWISHER, 1997). A modelagem *bottom-up* dá ênfase a variáveis técnicas, tratando as variáveis econômicas como exógenas, e tem como principal vantagem permitir a construção de cenários de longo prazo, levando em consideração aspectos dinâmicos que, possivelmente, não representarão apenas uma continuidade do passado. Sendo assim, fatores como decisões políticas, mudanças técnicas, mudanças na estrutura do PIB, dentre outros, são incorporados ao modelo.

Contudo, em virtude do elevado grau de desagregação dos modelos ascendentes, os efeitos inter-setoriais são de difícil avaliação. Outro aspecto negativo é que, muitas vezes, devido à complexidade do modelo, torna-se difícil a obtenção de determinados dados. Dessa forma, é necessário que as informações históricas utilizadas no desenvolvimento da projeção sejam precisas e que os parâmetros usados no modelo sejam prontamente quantificáveis para evitar a obtenção de soluções inconsistentes.

Torna-se evidente, então, que, dado o grande número de variáveis que podem ser abordadas na projeção do consumo de energia no setor de transportes, simulações elaboradas por diferentes instituições normalmente apresentem resultados diferentes visto que uma simulação pode estar relacionada com premissas econômicas, enquanto outra pode estar mais dependente de aspectos políticos e comportamentais da população.

Os cálculos apresentados neste estudo têm como intuito a obtenção de três fatores principais: a atividade do setor, medido em toneladas-quilômetro útil (TKU) por modal, para o transporte de carga, e passageiro-quilômetro (pkm) por modal, para o transporte de passageiros, o consumo de combustível e as emissões de GEE entre os anos de 2013 e 2050.

4.1 MODAL RODOVIÁRIO

Neste estudo, o modal rodoviário é o mais bem detalhado e analisado para a projeção de longo prazo do consumo e emissões do setor de transportes devido à elevada participação do transporte nacional rodoviário de passageiros e carga, conforme discutido no capítulo 1.

O modelo desenvolvido neste trabalho para a projeção do modal segue características similares para a evolução do transporte de carga e de passageiros. Trata-se de um modelo técnico-econômico, dividido por tipo de veículo (veículos leves, ônibus, caminhões e motos), cujos principais dados de saída são a projeção do consumo energético, da atividade veicular e das emissões de GEE do setor.

O consumo energético é determinado a partir da metodologia *bottom-up* paramétrica da demanda energética do setor de transportes apresentada por Correia (1996) e utilizada pelo Ministério do Meio Ambiente (2014), que relaciona o consumo energético total e a frota de veículos conforme a identidade contábil apresentada pela Equação 4:

$$C = \sum_{i=1}^k CS_i \cdot D_i \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde C representa o consumo total da frota por unidade de tempo; D é a distância percorrida pelo veículo i por unidade de tempo; CS é consumo específico do veículo i em litros/km; e k representa o número de veículos.

Assim sendo, fracionando-se a população de veículos por tipo de combustível, obtém-se o consumo para um período de um ano, representado pela Equação 5:

$$C_{i,j} = F_{i,j} \cdot D_{i,j} \cdot CS_{i,j} \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde C representa o consumo total da frota de veículos por tipo de combustível no ano i; D é a distância média percorrida pelos veículos por tipo de combustível no ano i; CS é o consumo específico médio da frota em litros/km no ano i; j representa os tipos de combustíveis.

A atividade veicular é determinada pelas projeções da frota, da quilometragem média percorrida e do fator médio de ocupação dos veículos, de acordo com a Equação 6:

$$A_{i,j} = F_{i,j} \cdot D_{i,j} \cdot O_{i,j} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde A representa o efeito atividade do modal j no ano i (passageiro-quilômetro ou tonelada-quilômetro); D é a distância média percorrida pela frota no ano i; O é o fator de ocupação (passageiro por veículo ou tonelada por veículo) no ano i; e j representa os tipos modais: veículos leves, ônibus, caminhões e motos.

As emissões veiculares de GEE são calculadas de acordo com a abordagem descendente do IPCC (2006), representada pela Equação 7. Essa metodologia é compatível com a considerada pela TCN (BRASIL/MCTIC, 2016).

$$E_{i,j} = C_{i,j} \cdot FE_j \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde E representa a emissão total de gases de efeito estufa por tipo de combustível no ano i; C é o consumo total por tipo de combustível no ano i; FE é o fator de emissão do combustível j em kg de CO₂eq por litro; j representa os tipos de combustíveis.

Logo, as principais variáveis-chave de simulação são:

- A frota de veículos, desagregada por tipo: veículos leves, caminhões, ônibus e motocicletas;
- O desempenho energético médio da frota de cada modal;
- A quilometragem média anual percorrida por cada modal;
- O fator de ocupação médio de cada modal;
- O fator de emissão de GEE de cada combustível.

Cabe destacar que o crescimento e o perfil da frota nacional de veículos automotores encontram-se sob influência de diversos fatores. Como destaca Moraes (2005), além da demografia, do PIB e do poder aquisitivo, outros fatores como infraestrutura disponível, cultura, estilo de vida, incentivos e políticas adotadas e grau de industrialização determinam o seu crescimento, que, por sua vez, é crucial para o desenvolvimento do país. Por esse lado, verifica-se que a forma como a frota evolui repercutirá preponderantemente na qualidade de vida da população, na dinâmica e competitividade do comércio, no consumo de combustíveis, no impacto ambiental, entre outros fatores.

Neste trabalho, opta-se por estimar a evolução da frota de veículos, dividida por categorias, a partir de metodologia estatística que segue como base a projeção das vendas de veículos e a probabilidade de sucateamento dos veículos por idade, conforme a Equação 8. A probabilidade de sucateamento de um veículo, que determina seu período de “sobrevivência”, é função de fatores como os preços dos veículos no mercado secundário, o valor da sucata, o custo de manutenção e a probabilidade de necessidade de reparo (sendo essa função da taxa de utilização do veículo, da probabilidade de acidentes, etc.) (MATTOS; CORREIA, 1996).

$$F_t = \sum_{x=1957}^t Z(x) \cdot [1 - Y(x)] \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde F representa a frota no ano t dos veículos; Z(x) é a venda acumulada dos veículos, desde o ano de 1957 que foi o primeiro ano de registro de venda de veículos no Brasil, até o ano t; Y(x) é a função distribuição acumulada, ou seja, é o percentual de veículos vendidos no ano x que foram sucateados.

4.1.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

Em virtude da magnitude e da variedade de combustíveis utilizados pelo transporte de passageiro, em especial pelos veículos leves, o maior desafio desta análise é a divisão da frota por tipo de combustível, pois é de se esperar que categorias não similares consumam quantidades diferentes de combustíveis. Neste trabalho, os veículos utilizados para o transporte de passageiros são divididos, de forma similar ao estudo do Ministério do Meio Ambiente (2014), em automóveis, comerciais leves, ônibus urbanos, micro-ônibus, ônibus rodoviário e motocicletas, como exibido no Quadro 5.

Quadro 5 – Veículos e Combustíveis Considerados no Transporte de Passageiros

Categoria do Veículo	Motor/Combustível
Motocicletas	Otto/Gasolina
	Otto/Flex fuel
Automóveis	Otto/Gasolina
	Otto/Etanol
	Otto/Flex fuel
	Otto/GNV
	Híbrido/Flex fuel
	Bateria/Eletricidade
Comerciais leves	Otto/Gasolina
	Otto/Etanol
	Otto/Flex fuel
	Diesel
Micro-ônibus	Diesel
Ônibus urbanos	Diesel
Ônibus rodoviários	Diesel

Fonte: Elaboração própria

Para fins de projeção das vendas de veículos, utiliza-se o conceito de elasticidade-renda da demanda, que mede a variação na quantidade demandada de bens pelos consumidores em relação a variações da renda e pode ser representada pela Equação 9.

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta q/q}{\Delta r/r} \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde ε_r é a elasticidade-renda da demanda; Δq é a variação na quantidade demandada; q é a quantidade demandada; Δr é a variação na renda; e r é a renda. Em termos simples, a elasticidade-renda da demanda consiste na variação percentual na quantidade demandada face a uma mudança percentual na renda.

Para estimar a elasticidade-renda da demanda dos veículos envolvidos no transporte de passageiros, o PIB é utilizado como *proxy* da renda, e a demanda é representada pela série histórica de vendas de automóveis, comerciais leves, motocicletas e ônibus. A metodologia consiste em uma regressão linearizada do logaritmo natural dessas duas variáveis, conforme a Equação 10:

$$\ln(\text{vendas}) = \alpha + \beta \ln(\text{PIB}) + \text{erro}_t \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde α representa o intercepto da regra de regressão e β seu coeficiente linear. Observando-se a Equação 10, conclui-se que β representa a elasticidade das vendas em relação ao PIB (ou elasticidade-renda da demanda), pois, se for realizada a derivada de ambos os lados da expressão, tem-se uma equação idêntica à Equação 6, disposta anteriormente (com β substituindo ε_r).

4.1.2 TRANSPORTE DE CARGA

A principal característica da metodologia do transporte rodoviário de carga é a inclusão dos parâmetros macroeconômicos, de crescimento da carga transportada, na metodologia básica *bottom-up*, descrita anteriormente. Assim, as variáveis de base para a simulação incluem as variáveis descritas no item 4.1, em conjunto com a carga anual transportada pelo modal rodoviário (em tonelada) por grupo de mercadoria. Destaca-se também a divisão considerada entre as categorias dos veículos, como exibido na Tabela 69.

Tabela 69 – Classificação dos Caminhões na Metodologia do Modal Rodoviário

Classificação	Peso bruto total (PBT)
Comerciais	$PBT \leq 3,5t$
Caminhões semileves	$3,5t < PBT \leq 6t$
Caminhões leves	$6t \leq PBT < 10t$
Caminhões médios	$10t \leq PBT < 15t$
Caminhões semipesados	$15t \leq PBT < 40t$
Caminhões pesados	$PBT \geq 40t$

Fonte: Elaboração própria

A quantidade de toneladas que efetivamente é demanda pelo setor rodoviário de cargas é estimada a partir da carga total transportada pelo setor de transportes e da distribuição modal das cargas transportadas. Salienta-se que, devido à falta de informação nas séries históricas, essa variável não é aberta por classe de veículo, diferentemente das demais.

A carga total transportada estabelece o total de toneladas de produtos que demandam transporte de cargas. É importante observar que essa variável não trata apenas dos valores demandados para o setor rodoviário, e sim para todo o setor de transporte de cargas. A distribuição modal, por sua vez, é uma variável adimensional que indica a porcentagem das toneladas totais efetivamente atendida pelo setor de transporte rodoviário de cargas.

Outra variável de base da análise é a descrição da quantidade de quilômetros rodados por ano para atender a demanda prevista de carga. Tal variável estabelece a quilometragem média rodada pelo veículo de determinada classe em um ano. Além disso, essa variável faz a diferenciação, dentro da classe, partindo da idade do veículo no ano calculado. Ou seja, dependendo da classe e da idade, o modelo em questão permite estabelecer se o veículo circulará mais ou menos em um ano.

Além da intensidade de uso, outras variáveis são definidas como variáveis de entrada: consumo específico e toneladas transportadas por veículo. O consumo específico é uma variável com unidade em quilômetros por litros (km/l). Tal variável estabelece relação entre o consumo energético de um veículo, em litros, para cada quilômetro rodado. Os valores de consumo específico são diferenciados por classe do veículo e pelo ano de fabricação.

A quantidade de toneladas transportadas por veículo representa a taxa de ocupação por cada classe de veículos de transporte rodoviário de cargas por viagem. É importante notar que os valores indicados nessa variável são sempre menores que a capacidade máxima dos veículos da classe em

questão. Alguns fatores corroboram esse efeito, dentre eles: capacidade útil de transporte ligeiramente diferente entre veículos da mesma classe; cargas cujo grande volume fazem com que o espaço físico para o transporte seja um limitador maior do que a capacidade de transporte; e, em especial, veículos que não circulam com sua capacidade máxima.

Assim, considera-se um fator de carregamento, que reflete o quão abaixo da capacidade máxima os veículos estão circulando, para fazer a correção do valor de quilômetros rodados para o cálculo da quantidade de toneladas-quilômetro efetivamente transportada.

Neste estudo, considera-se que o efeito da carga movimentada pelo setor de transportes incide diretamente sobre a frota de veículos e indiretamente sobre a venda de veículos. Portanto, duas premissas são adotadas: i) a primeira é que um setor amplamente competitivo como o rodoviário de cargas já otimiza ao máximo a quilometragem média anual percorrida por cada modal e seu fator de ocupação médio. Ainda há potencial para melhoria desses fatores, mas apenas com a ação de agentes externos ao setor; ii) a segunda é que o crescimento da frota de veículos se dá diante de uma resposta direta a demanda por transporte. Para este relatório, portanto, o crescimento da frota ocorre de forma uníssona à demanda por transporte. Faz-se necessário, então, que as vendas de veículos de cada ano sejam calculadas de forma iterativa para que o crescimento da frota sugerido seja alcançado, conforme apresentado na Figura 88.

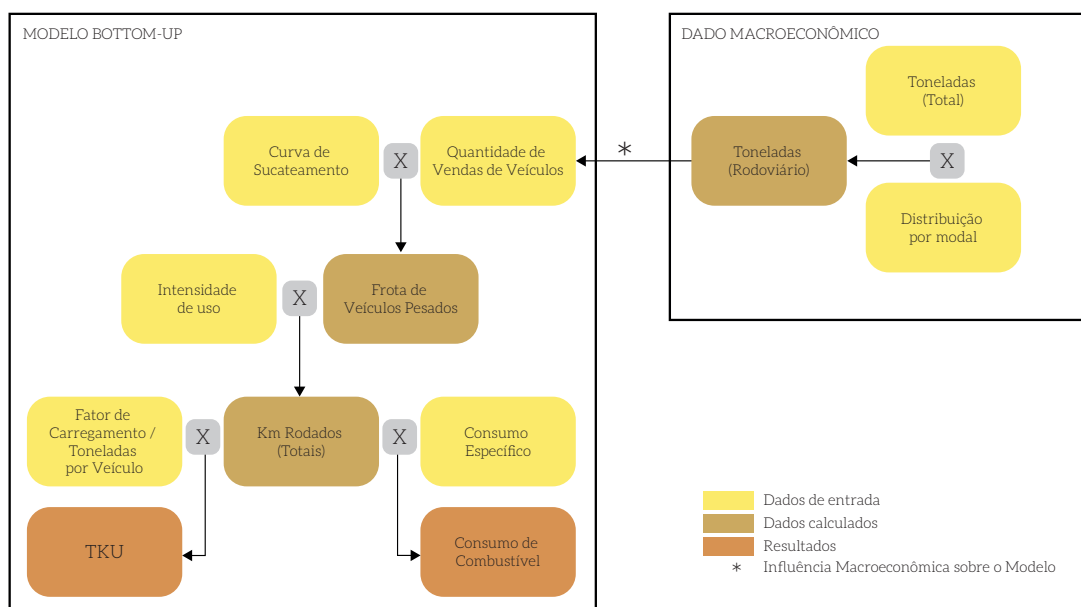


Figura 88 – Metodologia para a Projeção do Consumo no Transporte de Carga Rodoviário

Fonte: Elaboração própria

Neste estudo, serão construídos três cenários para o setor de transportes, com foco nas projeções de consumo de energia e emissões de GEE: cenário de referência (REF); cenário de baixo carbono (BC) e cenário de baixo carbono com inovação (BC+I). No que se refere ao cenário BC, cabe destacar que as ações feitas em outros modais impactam diretamente a distribuição das cargas transportadas entre os modais. Essa distribuição, descrita posteriormente, tem impacto direto sobre o efeito atividade do setor, expresso em TKU. Assim, com a quantidade de toneladas efetivamente transportada, os novos valores de TKU calculados passam a influenciar diretamente a venda de veículos.

De forma a facilitar o entendimento comparativo entre os cenários, é importante frisar que, das variáveis de entrada mostradas na Figura 88, a distribuição por modal e, por consequência disso, a venda de veículos são diferentes entre os dois cenários. Além disso, o dado de entrada consumo específico é diferente nos dois cenários. Com isso, as variáveis calculadas, frota e quilômetros rodados, assim como os resultados, TKU e consumo de combustível, também são diferentes. Todos os demais dados de entradas são iguais nos dois cenários.

4.2 MODAL FERROVIÁRIO

4.2.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

Conforme discutido no capítulo 1, a participação do modal ferroviário no transporte de passageiro tem decrescido nos últimos anos. Diante da participação reduzida no transporte de passageiro e da redução do indicador de passageiro-quilômetro, em particular no segmento sobre trilhos, a modelagem para simulação da demanda desse modal é mais simples em face dos outros modais, estando focada no sistema metroviário. Em linhas gerais, o consumo de energia é estimado pela evolução do número de pkm e pelo indicador de intensidade energética – kWh por pkm, conforme a Equação 11:

$$C_t = PKm_t \cdot I_t \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde PKm_t representa o número de passageiros-quilômetro transportados no tempo t ; I_t é a intensidade energética medida em kWh/pkm no tempo t ; e C_t é o consumo de energia no setor de transporte ferroviário de passageiros em t .

4.2.2 TRANSPORTE DE CARGA

A projeção da quantidade de tonelada-quilômetro transportada pelo modal ferroviário é realizada de maneira similar ao modal rodoviário, de acordo com a Equação 12:

$$TKU_i = F_i \cdot DM_i \cdot TU_i \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde TKU_i representa a tonelada-quilômetro transportada pelo modal ferroviário o ano i ; F_i é a frota de vagões no ano i ; DM_i é a distância média percorrida por vagão, em quilômetros, no ano i ; e TU_i representa a carga útil transportada por vagão, em toneladas, no ano i .

Tendo em vista que os dados de carga útil transportada por vagão correspondem à capacidade real de transporte dos vagões, há a necessidade de inclusão de um fator de correção para estimar a capacidade efetivamente utilizada nos trajetos percorridos pelos vagões. Esse fator de correção corresponde a um percentual da capacidade útil dos vagões, ou seja, representa a eventualidade de os vagões andarem com quantidade de toneladas abaixo de sua capacidade real. A Figura 89 exhibe o fluxograma da metodologia da projeção da tonelada-quilômetro transportada por ano e concessionária, para o horizonte 2050, com a inclusão do fator de correção.

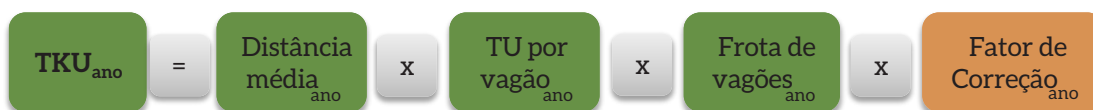


Figura 89 – Metodologia para a Projeção do TKU no Transporte de Carga Ferroviário

Fonte: Elaboração própria

O cálculo do consumo de combustível no transporte de carga ferroviário, que se concentra no óleo diesel, segue a metodologia apresentada na Figura 90, fragmentado por concessionária de ferrovia e por ano de análise.



Figura 90 – Metodologia para a Projeção do Consumo no Transporte de Carga Ferroviário

Fonte: Elaboração própria

Por fim, as emissões de GEE são projetadas a partir do consumo de combustível do setor e do fator de emissão do combustível, conforme apresentado na Figura 91.



Figura 91 – Metodologia para a Projeção das Emissões no Transporte de Carga Ferroviário

Fonte: Elaboração própria

4.3 MODAL AÉREO

A abordagem selecionada para estimar os parâmetros de projeção do setor de transporte aéreo considera o produto de dois fatores: o nível de atividade e a intensidade de energia (o uso de energia por unidade de serviço).

4.3.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

Para o transporte aéreo de passageiros, os dois parâmetros para a cenarização de longo prazo são o número de assentos-quilômetro ofertados (ASK) e o indicador de intensidade energética (ASK) por metro cúbico de combustível. A Equação 13 resume a estrutura do modelo de projeção de demanda de energia no setor de transportes:

$$C_t = \text{ASK}_t \cdot I_t \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde ASK_t representa o número de assentos-quilômetro ofertados no tempo t ; I_t é a intensidade energética medida em m^3 de combustível por ASK no tempo t ; e C_t é o consumo de querosene de aviação no setor de transporte aéreo de passageiros em t .

O parâmetro ASK reflete o nível de atividade do setor de transporte aéreo de passageiros, sendo que quanto maior o nível de atividade, maior será a necessidade de serviço de energia. O nível de intensidade energética, por sua vez, depende da eficiência energética, incluindo tanto os aspectos operacionais quanto os tecnológicos.

Conforme discutido no capítulo 1 deste estudo, o nível de atividade do setor tem correlação com o nível de atividade econômica (taxa de crescimento do PIB), a elasticidade-renda da demanda (relação entre a taxa de crescimento do PIB e a taxa de crescimento do pkm), a taxa de câmbio e a taxa de ocupação das aeronaves (*load fator*). Para a projeção do parâmetro ASK, utiliza-se a Equação 14:

$$ASK_t = PKM_{t-1} \cdot 1 + (\alpha_t \cdot PIB_t) \cdot \frac{1}{(LF_{t-1} + Ef_t)} \quad (\text{Eq. 14})$$

Onde ASK_t é o número de assentos-quilômetro ofertados no período t ; PKM_{t-1} representa o número de passageiros-quilômetro transportados no período $t-1$; α_t é a elasticidade-renda da demanda por transporte aéreo no período t ; PIB_t representa a taxa de crescimento da economia brasileira no período t ; LF_{t-1} é a taxa de ocupação das aeronaves no período $t-1$; e Ef_t é a eficiência operacional esperada das companhias aéreas em t .

Assim, a demanda por transporte aéreo está diretamente correlacionada com a atividade econômica do país, traduzida pelo PIB. Dessa forma, o crescimento dos gastos com turismo nacional e internacional, viagens a negócios, dentre outros fatores, podem ser explicados pelo crescimento do PIB, cujo efeito será sentido em termos de incremento no tráfego aéreo (pkm).

Embora a taxa de câmbio não esteja presente na Equação 14, ela influenciará o nível de atividade do setor e servirá como balizador para a elasticidade-renda – α – porque grande parte dos custos do setor está em dólar (*leasing* das aeronaves, preço do querosene de aviação, preços das tarifas aéreas, por exemplo). Logo, um cenário com apreciação ou depreciação da moeda nacional em face do dólar fará que α varie para mais ou menos, respectivamente.³⁶

A taxa de ocupação das aeronaves é uma variável indiretamente relacionada à evolução do ASK porque quanto maior a taxa de ocupação de uma aeronave, menor é a necessidade de ASK que deverá ser ofertada. Também pode ser entendida como uma medida de eficiência das companhias aéreas, pois quanto maior a taxa de ocupação, maior será a receita operacional realizada em determinado voo. O *benchmarking* dessa taxa está em torno de 80% para voos nacionais e 85% para voos internacionais.

Por fim, a variável Ef_t está correlacionada a estratégias utilizadas pelas companhias aéreas para otimização de seu desempenho. Essa variável também pode refletir o nível de competição do setor, pois quanto maior o número de empresas aéreas, maior a taxa de ocupação das aeronaves.

Podemos concluir que a evolução do nível de atividade desse setor no período t , dado pelo ASK, será função do pkm no período $t-1$, da taxa de crescimento da economia no período t , da elasticidade-renda no período t e estará inversamente relacionada à taxa de ocupação no período $t-1$ e a eficiência operacional das companhias aéreas no período t .

³⁶ Um real mais apreciado reduzirá os custos do setor, favorecendo o crescimento da demanda por pkm.

O parâmetro de intensidade energética do setor de transporte aéreo de passageiros refletirá os ganhos em termos de eficiência energética cujo efeito seja realizado sobre a variação de consumo do combustível que podem ocorrer de diversas maneiras, conforme discutido no capítulo 1 deste estudo: aviões maiores, redução no peso das aeronaves, avanço tecnológico nas turbinas, ou ainda a troca da frota por aeronaves mais modernas. Ou seja, todos os fatores anteriormente listados fazem que as aeronaves transportem mais passageiros – ou seja, ofertem mais assentos ASK com a mesma quantidade de QAV.

O indicador de intensidade serve como base para as premissas de projeção dos anos consecutivos. Neste estudo, a evolução do parâmetro de intensidade energética I_t é função das seguintes variáveis: do indicador I_{t-1} do período anterior, dos ganhos em eficiência tecnológica no período t (motores mais eficientes, aeronaves mais leves, por exemplo) e dos ganhos em eficiência operacional no período t (aeroportos mais modernos, sistemas integrados de gerenciamento de tráfego aéreo, por exemplo), conforme apresentado na Equação 15:

$$I_t = I_{t-1} \cdot (1 + \lambda_t + \gamma_t) \quad (\text{Eq. 15})$$

Onde I_t é ASK por m^3 de combustível em t ; I_{t-1} é ASK por m^3 de combustível em t ; λ_t representa ganho em eficiência tecnológica no período t ; e γ_t é ganho em eficiência operacional no período t . É importante ressaltar que as variáveis λ_t e γ_t são fortemente influenciadas pelo contexto do cenário utilizado para a projeção.

4.3.2 TRANSPORTE DE CARGA

No Brasil, o modal aéreo para transporte de cargas tem pouca representatividade, se comparado aos modais hidroviário e rodoviário, conforme detalhado no capítulo 1 deste estudo. Em geral, a carga transportada no Brasil segue via voos comerciais no porão das aeronaves, sendo a frota de aviões cargueiros pouco representativa em face da frota de aeronaves comerciais.

Para a projeção do modal aéreo de carga, os dois parâmetros de projeção são: o número de toneladas-quilômetro transportadas (TKM) e o indicador de intensidade energética – litros por TKM. O modelo, portanto, correlaciona esses dois parâmetros principais, sendo que quanto maior o nível de atividade, maior será a necessidade de serviço de energia. O nível de atividade é função da taxa de crescimento do comércio internacional (exportações e importações). A Equação 16 resume a estrutura do modelo de projeção de demanda de energia no setor de transporte de carga aéreo no tempo t .

$$C_t = [TKU_t(\text{exp}) + TKU_t(\text{imp})] \cdot I_t \quad (\text{Eq. 16})$$

Onde TKU_t é toneladas-quilômetro transportadas por exportações e por importações em t ; I_t representa os litros por TKU consumidos em t ; e C_t é o consumo de querosene de aviação no setor de transporte aéreo de cargas em t .

4.4 MODAL HIDROVIÁRIO

4.4.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

A evolução do passageiro-quilômetro transportado, para as linhas de navegação analisadas, para o período entre 2013 e 2050, segue a metodologia apresentada na Equação 17:

$$PKmt = \sum_{n=1}^{317} P_{n,t-1} \cdot (1 + Cr_{n,t}) \cdot Km_{n,t} \quad (\text{Eq. 17})$$

Onde pkm_t é a quantidade de passageiros-quilômetro transportada relativa ao ano analisado; n representa cada uma das 317 linhas de navegação de passageiros no transporte hidroviário e marítimo de passageiros; P é a quantidade de passageiros transportados no ano predecessor ao analisado (em t); Cr é a taxa percentual de crescimento anual do número de passageiros relativo à linha de navegação considerada; e Km representa a distância média percorrida (em km) para cada uma dos 317 linhas de navegação existentes.

A obtenção dos volumes do óleo diesel marítimo proveniente do transporte de passageiros por aquavias até 2050 é relacionada com o consumo específico das embarcações, conforme a Equação 18. As emissões de GEE associadas ao volume de combustível consumido por ano, por sua vez, são calculadas em conformidade com as emissões de GEE constantes do capítulo 2.

$$C_t = PKm_t \cdot I_t \quad (\text{Eq. 18})$$

Onde C_t é o consumo de combustível no ano t ; I_t representa os litros por pkm consumidos em t ; e PKm_t é a atividade do setor, medida em passageiros-quilômetros, no ano t .

4.4.2 TRANSPORTE DE CARGA

A projeção da tonelada-quilômetro útil (TKU) transportada pelas hidrovias é subdividida entre grupos de mercadorias, sendo baseada no crescimento de cada grupo de mercadorias, conforme apresentado na Equação 19:

$$TKU_t = \sum_{n=1}^{30} T_{n,t-1} \cdot (1 + Cr_{n,t}) \cdot Km_{n,t} \quad (\text{Eq. 19})$$

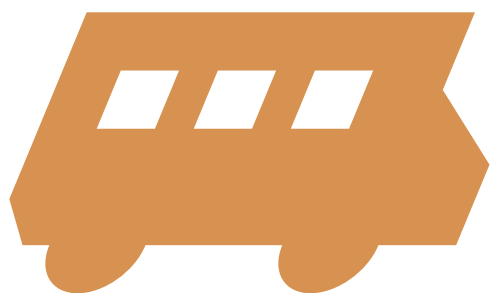
Onde TKU_t é a quantidade de toneladas-quilômetro útil transportada relativa ao ano analisado; n representa cada um dos 30 grupos de mercadorias transportados em hidrovias e na cabotagem;³⁷ T é a quantidade de toneladas transportadas no ano predecessor ao analisado (em t); Cr é a taxa percentual de crescimento anual da tonelada transportada do grupo de mercadorias; e Km representa a distância média percorrida (em quilômetros) para cada um dos 30 grupos de mercadorias.

37 A Antaq classifica as mercadorias transportadas pelo modal hidroviário em 30 grupos distintos. Dessa forma, neste trabalho, a projeção do TKU do modal é baseada nesses grupos de mercadoria da Antaq.

A obtenção dos volumes do óleo diesel e óleo combustível marítimos provenientes do transporte hidroviário e cabotagem de carga no horizonte 2050 segue a metodologia apresentada para o transporte de passageiros, que relaciona o consumo do setor com a atividade e o consumo específico, conforme Equação 20. As emissões de GEE associadas ao volume de combustível para cada ano são calculadas a partir do fator de emissão dos combustíveis, em conformidade com o capítulo 2.

$$C_t = TKU_t \cdot I_t \quad (\text{Eq. 20})$$

Onde C_t é o consumo de combustível no ano t ; I_t representa os litros por TKU consumidos em t ; e TKU_t é a atividade do setor, medida em toneladas-quilômetros, no ano t .



Cenário de referência

Capítulo

5

5 CENÁRIO DE REFERÊNCIA

Neste capítulo, elabora-se o cenário de referência, com foco nas projeções de consumo energético, efeito atividade e emissões de GEE do setor de transportes, no horizonte 2050, a partir da evolução das variáveis apresentadas no capítulo 4. Tendo em vista a melhor avaliação das premissas e hipóteses de trabalho adotadas neste estudo, estas são apresentadas separadamente por modal.

Nesse cenário, não são previstas rupturas ou mudanças drásticas na trajetória das variáveis-chave do modelo no horizonte de análise, sendo mantidas as tendências setoriais já em curso. Assim sendo, as principais variáveis de análise desta projeção são mantidas constantes ou atreladas ao crescimento econômico e populacional, caracterizando um cenário tendencial com a manutenção da estrutura atual do setor de transportes do país. No cenário macroeconômico adotado, o PIB nacional crescerá com taxas anuais aproximadamente entre 1,5% e 2,7% ao ano, conforme apresentado na Tabela 70. A taxa de crescimento anual de *commodities* e produtos transportados no país segue a projeção prevista por Haddad (2015), conforme apresentado na Tabela 134 – Anexo.

Tabela 70 – Taxa de Crescimento Médio Anual do PIB por Quinquênio

Período	Crescimento Médio Anual
2011-2015	1,52%
2016-2020	2,26%
2021-2025	2,66%
2026-2030	2,49%
2031-2035	2,30%
2036-2040	2,11%
2041-2045	1,93%
2046-2050	1,77%

Fonte: HADDAD, 2015

No tocante ao crescimento populacional, de acordo com o IBGE (2013), a população do Brasil passará de 199 milhões de habitantes, em 2012, para 226 milhões, em 2050, apresentando crescimento acentuado até 2040 e redução da população após 2040, conforme apresentado na Figura 92.

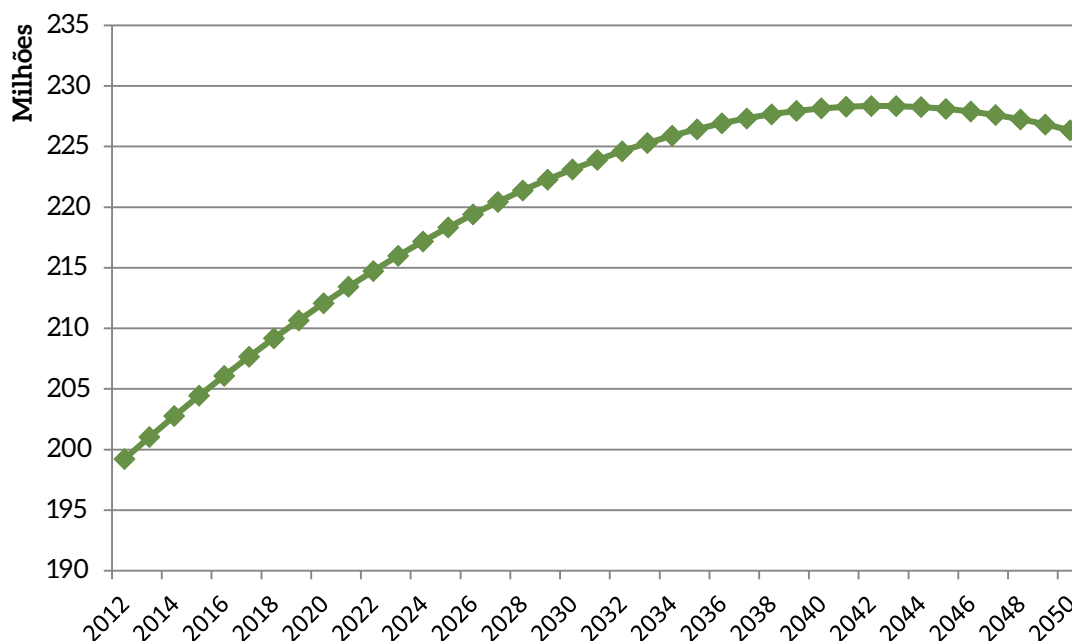


Figura 92 – Crescimento da População Brasileira entre 2012 e 2050

Fonte: BRASIL/IBGE, 2013

A taxa de crescimento anual das *commodities* e dos produtos transportados no país segue a projeção prevista, conforme exibido na Tabela 134 – Anexo (HADDAD et al., 2015). Quanto aos biocombustíveis, o cenário REF prevê o aumento gradual da mistura obrigatória de biodiesel ao óleo diesel, do nível atual de 7%³⁸ para 8% em 2017 e 10% em 2020, permanecendo nesse patamar no horizonte 2050; e de adição de 27% e 25% de álcool anidro na gasolina comum e premium, respectivamente, no horizonte 2050. Com relação ao uso de biocombustíveis na aviação (biojet), a premissa adotada para o cenário REF é bastante conservadora, cuja utilização será mandatória a partir do ano 2045, alcançando o patamar de 5% no ano de 2050.

Diante disso, as subseções 5.1 a 5.4 tratarão das premissas e estimativas relacionadas aos modais, com vistas a fornecer as bases de projeção para o consumo de energia e emissões de GEE do setor de transportes no horizonte 2050, que serão destacadas na subseção 5.5.

38 O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) do governo brasileiro autorizou a comercialização e o uso voluntário de misturas com biodiesel em quantidade superior ao percentual de sua adição obrigatória ao óleo diesel, segundo resolução publicada no Diário Oficial da União. Apesar de autorizar o uso voluntário maior, a resolução pondera que ficará vedada a comercialização na revenda varejista de misturas com biodiesel em quantidade superior ao percentual de adição obrigatória enquanto não houver garantia ampla dos fornecedores de veículos, motores, sistemas, máquinas e equipamentos. Atualmente, os postos de abastecimento brasileiros vendem diesel com uma mistura obrigatória de 7% de biodiesel. Segundo a resolução, frotas cativas ou consumidores rodoviários atendidos por ponto de abastecimento terão limites máximos de adição de biodiesel ao óleo diesel de 20%, no caso do uso voluntário. No caso do transporte ferroviário, industrial e agrícola, o limite será de 30%. O uso experimental poderá usar 100% de biodiesel. A resolução define ainda que a mistura maior fica condicionada ao atendimento das disposições complementares estabelecidas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

5.1 MODAL RODOVIÁRIO

Conforme discutido, este estudo utiliza para a modelagem do modal rodoviário um modelo paramétrico de consumo de energia e da atividade veicular baseado em quatro variáveis-chave:

- i) Evolução da frota de veículos, baseada nas vendas de veículos novos e na probabilidade de sucateamento da frota circulante;
- ii) Evolução acerca da intensidade de uso (ou quilometragem percorrida anualmente);
- iii) Evolução do consumo específico (ou autonomia veicular);
- iv) Evolução do fator de ocupação.

O processo de definição do valor dessas variáveis para o ano-base é relativamente simples, uma vez que elas podem estar diretamente disponíveis (como no caso da venda de veículos, registrada pela Anfavea). Para aquelas que não puderem ser obtidas de forma direta, há dados que permitem ajustes e inferências a respeito de seus valores. A seguir, apresentam-se as premissas para estimar a evolução dessas variáveis no cenário REF.

5.1.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

No que diz respeito ao modal rodoviário de passageiros, a construção do cenário REF prevê tendência inerente à concentração nos automóveis em detrimento do transporte coletivo feito por ônibus devido ao aumento do poder aquisitivo da população e ao cenário tendencial de políticas de incentivo ao transporte público. Tal tendência eleva o nível de congestionamento nas cidades, o que, com a ausência de infraestrutura adequada, impacta o desempenho energético dos veículos e, consequentemente, afeta o consumo de combustível do setor.

5.1.1.1 EVOLUÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS

A projeção da frota de veículos leves no período de simulação é baseada na contraposição das taxas de crescimento das vendas de veículos novos e de sucateamento de veículos existentes. As vendas de veículos novos são atreladas diretamente ao crescimento econômico do país, a partir da elasticidade-renda da demanda, apresentada na Equação 10, para o período entre 1962 e 2012, conforme os dados expostos na Tabela 71.

Tabela 71 – Dados Utilizados para Cálculo das Elasticidades

Ano	PIB (milhões de R\$ 2012)	Automóveis	Comerciais Leves	Ônibus	Motocicletas
1962	550.360	83.541	67.068	3.193	–
1963	553.662	94.619	55.184	2.299	–
1964	572.487	103.427	53.680	2.553	–
1965	586.226	114.882	47.765	2.927	–
1966	625.503	127.865	59.532	3.609	–
1967	651.775	139.211	55.304	4.766	–
1968	715.649	164.341	66.814	6.996	–
1969	783.635	241.542	62.891	5.621	–
1970	865.133	308.024	66.390	4.100	–
1971	962.893	395.266	72.378	4.304	–
1972	1.077.478	457.124	89.732	4.206	–
1973	1.228.324	557.692	106.318	6.333	–
1974	1.329.047	639.668	116.825	7.070	–
1975	1.398.157	661.332	118.314	8.780	5.220
1976	1.542.168	695.207	114.971	10.972	12.800
1977	1.617.734	678.824	71.861	12.012	32.791
1978	1.698.621	797.942	83.668	11.859	41.492
1979	1.814.127	828.733	95.957	11.524	63.636
1980	1.981.026	793.028	93.768	11.532	125.000
1981	1.895.842	447.608	68.000	9.171	155.572
1982	1.911.009	556.229	85.763	8.042	215.767
1983	1.855.590	608.499	78.085	6.576	219.000
1984	1.955.792	532.235	95.966	5.983	180.000
1985	2.108.343	602.069	98.306	7.141	161.378
1986	2.266.469	672.384	114.002	8.488	166.994
1987	2.345.796	410.260	103.372	10.068	181.500
1988	2.343.450	556.744	123.092	12.968	166.961
1989	2.418.440	566.582	137.380	9.486	167.431
1990	2.314.447	532.835	128.431	10.091	146.735
1991	2.337.592	597.601	134.552	16.866	116.321
1992	2.325.904	596.475	127.687	13.706	86.194
1993	2.439.873	902.692	177.558	11.396	83.458
1994	2.583.826	1.126.665	202.786	12.595	141.140
1995	2.692.346	1.407.073	245.205	17.368	217.327
1996	2.751.578	1.405.545	267.591	15.518	288.073
1997	2.845.132	1.569.727	303.938	14.862	426.547

Ano	PIB (milhões de R\$ 2012)	Automóveis	Comerciais Leves	Ônibus	Motocicletas
1998	2.845.132	1.211.885	254.538	15.761	475.725
1999	2.853.667	1.011.847	183.762	10.679	473.802
2000	2.976.375	1.176.774	227.059	16.439	634.984
2001	3.015.067	1.295.096	216.091	16.578	753.159
2002	3.096.474	1.229.146	175.119	16.790	861.469
2003	3.130.536	1.118.603	173.147	17.413	954.620
2004	3.308.976	1.295.800	227.721	16.982	1.057.333
2005	3.414.863	1.369.182	249.765	15.364	1.213.517
2006	3.551.458	1.556.220	275.492	19.767	1.413.062
2007	3.768.097	1.975.518	365.514	23.198	1.734.349
2008	3.964.038	2.193.277	477.714	27.010	2.140.907
2009	3.952.146	2.474.764	533.978	22.625	1.539.473
2010	4.248.557	2.644.706	684.242	28.422	1.830.614
2011	4.363.268	2.647.255	778.484	34.638	2.136.891
2012	4.402.537	2.851.425	782.577	28.809	1.690.187

Fonte: Elaboração própria a partir de BRASIL/IBGE, 2013; BRASIL/IBGE, 2014; ANFAVEA, 2015; ABRACICLO, 2014

A aplicação da metodologia descrita aos valores históricos resulta nos valores para a elasticidade-venda do PIB apresentados na Tabela 72.

Tabela 72 – Elasticidade-venda do PIB Calculada

Tipo de Veículo	Elasticidade-vendas do PIB	Coeficiente de determinação (R ²)
Automóveis	1,396	0,893
Comerciais leves	1,019	0,735
Ônibus	1,006	0,868
Motocicletas	2,232	0,832

Fonte: Elaboração própria

Cabe destacar que a Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares (ABRACICLO, 2014) não apresenta dados para anos anteriores a 1975. A série histórica da Anfavea (2015) apresenta dados até o ano de 1957, contudo os anos iniciais da série histórica não foram utilizados por terem sido atípicos e apresentarem crescimentos vertiginosos no nível de vendas (o que poderia ser esperado em um mercado imaturo). Fato semelhante ocorreu com a venda de motocicletas. Se calculada a elasticidade com base em toda a série histórica disponível, seu valor seria de 4,389, o que resultaria em uma frota de mais de 450 milhões de motocicletas em 2050 – valor equivalente a aproximadamente o dobro da projeção populacional do IBGE para esse ano (BRASIL/IBGE, 2013). Dessa forma, a elasticidade da venda de motocicletas foi calculada com base na série de 2002-2012, período que permitiu um bom ajuste da regressão.

Segundo estudo realizado em 1998 pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), entre diferentes modelos utilizados, a elasticidade-renda calculada pelos autores situava-se entre os valores de 1,1 e 1,5, dependendo do modelo de cálculo utilizado (BRASIL/IPEA, 1998). O valor calculado de 1,396 situa-se, portanto, na faixa definida pelo Ipea.³⁹ Em estudo mais recente, Fauth et al. (2009) estimaram a elasticidade-renda da venda de automóveis em 1,19. Nenhum dos estudos averiguou a elasticidade-renda dos demais veículos aqui abordados (comerciais leves, ônibus e motocicletas).⁴⁰

Vislumbrando uma possível saturação da frota de automóveis e de motocicletas no Brasil, são estimadas elasticidades-renda da demanda para os períodos de 2025-2034 no valor de 0,5 e, de 2035-2050, no valor de 0,1, de modo a alcançar cerca de 85 milhões de automóveis e 45 milhões de motocicletas em 2050. Tais parâmetros são estimados considerando-se que a razão definida pela frota de automóveis por mil habitante em 2030 se aproximasse à da Coreia do Sul no mesmo ano e à da China em 2050 (DARGAY; GATELY; SOMMER, 2007). Em 2050, tal indicador nacional se aproximaria dos valores apresentados pela República Tcheca em 2030 e pela África do Sul em 2050 (DARGAY; GATELY; SOMMER, 2007).

Como a Anfavea (2015) não desagrega as vendas de ônibus nas categorias aqui utilizadas, a elasticidade-renda de micro-ônibus, ônibus urbanos e ônibus rodoviários é considerada igual ao valor calculado para ônibus. Durante o período de projeção, a distribuição das vendas entre essas três categorias de ônibus é calculada com base nos dados de Brasil/MMA (2014). Cabe mencionar também que as vendas de comerciais leves não é considerada igual à Anfavea (2015), uma vez que apenas uma parcela dos veículos comerciais leves é dedicada ao transporte de passageiros – assume-se no presente estudo que esse percentual é de 80%, conforme discutido no capítulo 1 deste trabalho.

Quanto à curva de sucateamento por categoria de veículos, os parâmetros utilizados seguem como base o estudo do Ministério do Meio Ambiente (BRASIL/MMA, 2014), conforme apresentado na Figura 93. Para fins de simulação do cenário REF, estima-se que esse perfil de sucateamento não sofrerá alteração ao longo do horizonte de análise.

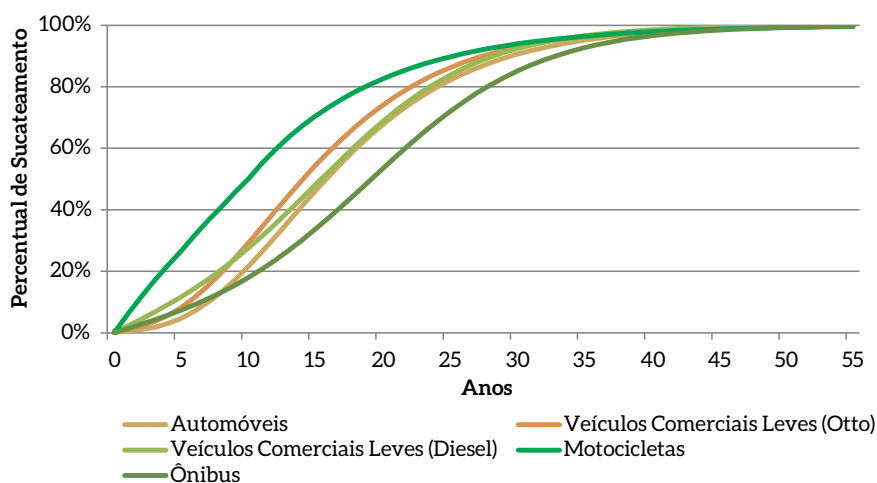


Figura 93 – Curva de Sucateamento de Autoveículos no Transporte de Passageiros

Fonte: BRASIL/MMA, 2014

³⁹ É interessante notar que, caso seja utilizada a mesma série histórica do Ipea (até 1997), a elasticidade-renda calculada conforme a metodologia adotada neste trabalho é de 1,3 – valor muito próximo à média dos dois extremos definidos pelo Ipea.

⁴⁰ Fauth et al. (2009) calcularam a elasticidade da venda de ônibus em relação à produção física industrial, cujo resultado foi de 2,16.

Dessa forma, a composição das vendas de veículos, a partir da elasticidade-renda da demanda por tipo de veículo e do crescimento do PIB previsto para o período de análise, apresentado na Tabela 70, juntamente com a determinação da saturação da frota de automóveis e de motocicletas e a curva de sucateamento dos veículos existentes, permite a composição da frota de veículos automotores para transporte de passageiros no país, conforme exibido na Figura 94.

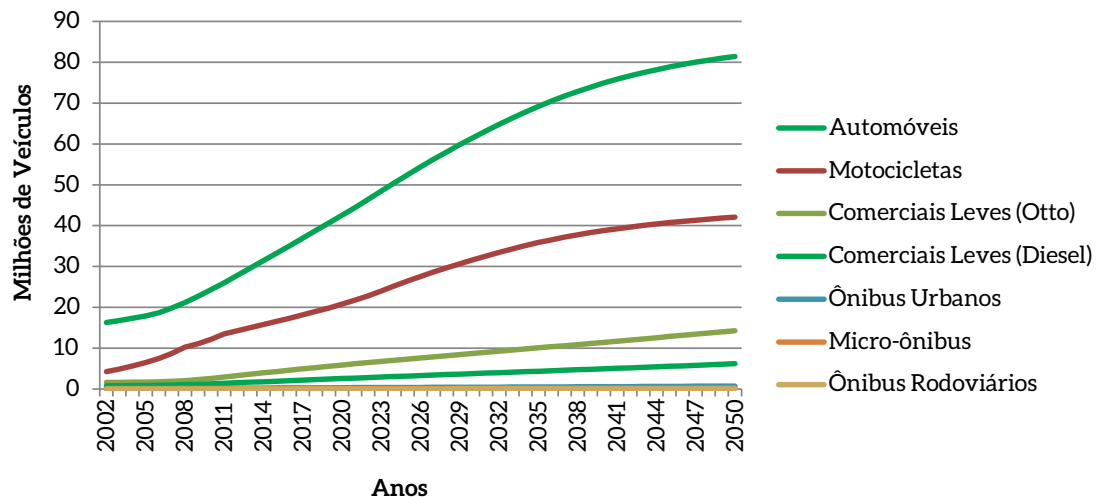


Figura 94 – Evolução da Frota Circulante

Fonte: Elaboração própria

Observa-se, portanto, que a frota de automóveis leves alcança o montante de 81 milhões ao fim do período analisado. Motocicletas são a segunda categoria mais numerosa, ultrapassando 40 milhões de veículos em 2050, seguidas pela frota de comerciais leves, com 20 milhões no mesmo ano. Por fim, os ônibus (somados) superam 1 milhão de veículos em 2050.

Na determinação do tipo de combustível de cada veículo vendido, um destaque deve ser feito aos veículos leves do ciclo Otto. Conforme disposto no Quadro 5, tais motores podem operar movidos a gasolina, etanol, uma mistura de ambos (*flex fuel*) ou ainda GNV. Cabe ao consumidor decidir, no momento de abastecer seu veículo, qual combustível utilizar.

No caso dos veículos *flex*, o percentual da frota de veículos bicomcombustíveis com opção pelo etanol é assumido praticamente constante em cerca de 35% (em volume). No horizonte 2050, assume-se que apenas no estado de São Paulo, maior produtor e consumidor de etanol hidratado do país (MILANEZ et al., 2010), o etanol se mantém competitivo e responsável pelo abastecimento de 100% da frota *flex* durante a safra da cana-de-açúcar. O percentual de 35% foi calculado supondo-se a representatividade da frota *flex* do estado de São Paulo de aproximadamente 50% da frota nacional, aliado ao fato de a safra de cana-de-açúcar tornar os preços favoráveis em cerca de dois terços do ano. Dessa forma, supõe-se que, em cerca de 70% do ano, metade da frota *flex* brasileira utiliza etanol, totalizando 35% do volume de combustível consumido ao longo do ano no país. Em relação à frota de GNV, são adotados os valores informados pelo Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP, 2014), o que totaliza uma frota de aproximadamente 1,8 milhão de veículos convertidos ao GNV em 2014, frota mantida constante até 2050.

No cenário REF, considera-se também a introdução de veículos leves híbridos e elétricos a bateria no horizonte 2050. Assim como feito em Brasil/EPE (2014b), assumiu-se que a introdução de veículos híbridos se intensifica principalmente a partir de 2030 e atinge um percentual majoritário nas vendas até o fim do período analisado. No presente estudo, considera-se que a venda de híbridos, que se situa em torno de 5% dos automóveis em 2030, cresce de forma significativa nas duas décadas posteriores, a um ritmo de aproximadamente 20% ao ano, e alcança um montante superior a 40 milhões de veículos em 2050 – o que representa, aproximadamente, 80% das vendas totais. O percentual da frota de veículos híbridos bicomcombustíveis assume as mesmas premissas utilizadas nos veículos *flex fuel* (opção pelo etanol constante em cerca de 35%, em volume). Por fim, considerou-se a penetração de veículos elétricos a bateria (VEB) a partir de 2040, chegando em 2050 com uma participação de 5% das vendas totais de automóveis.

Destaca-se, ainda, que as tecnologias avançadas de veículos automotivos, que incluem os veículos *plug-in* e a célula a combustível, não são considerados como tecnologias com entrada tendencial no período entre 2013 e 2050 devido aos elevados custos de aquisição, não sendo, portanto, incluídos no cenário REF. A Figura 95 apresenta a evolução da composição da frota por tipo de combustível.

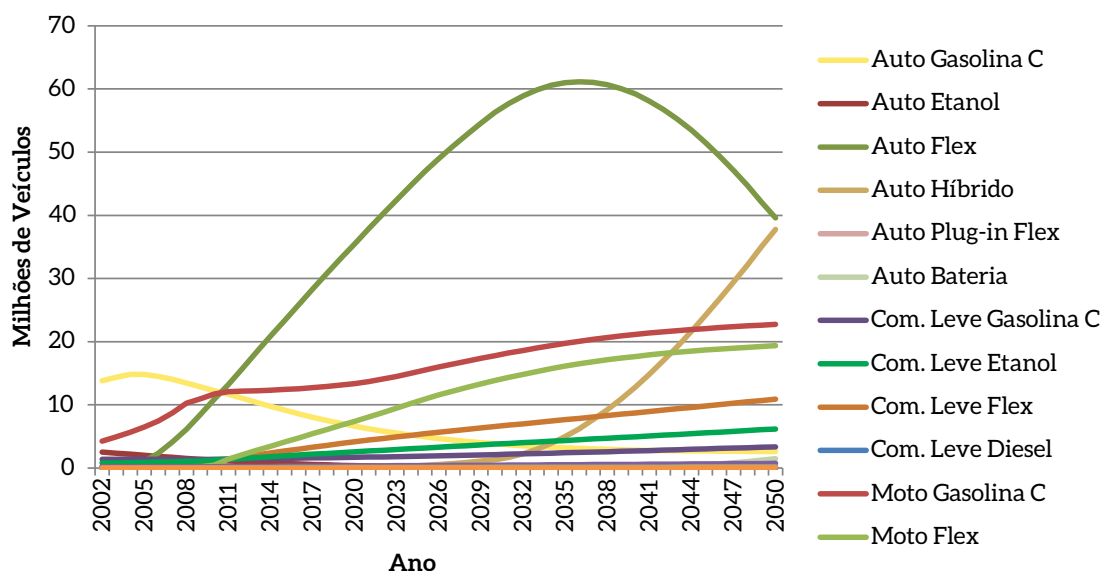


Figura 95 – Frota Circulante por Tipo de Combustível

Fonte: Elaboração própria

5.1.1.2 EVOLUÇÃO DA INTENSIDADE DE USO

No cenário REF, o comportamento da quilometragem média percorrida pelos veículos de passageiros, de acordo com a idade do veículo, é mantido constante em relação ao ano-base da simulação, conforme a Figura 96, até o ano de 2020. O levantamento e a discussão desse perfil de uso do veículo foram apresentados no capítulo 1 deste estudo.

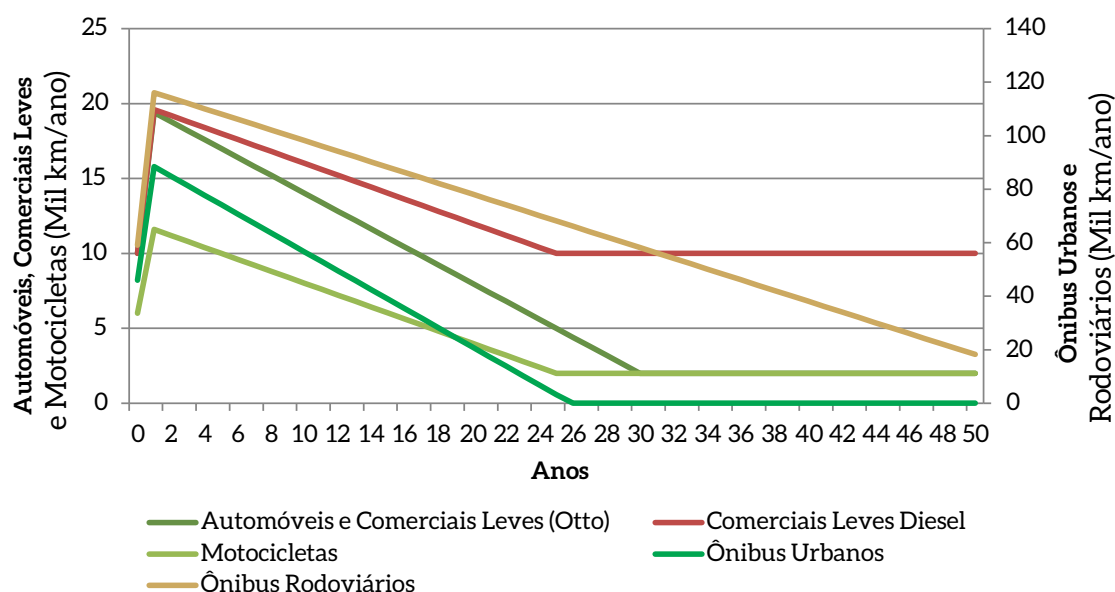


Figura 96 – Intensidade de Uso – Transporte de Passageiros

Fonte: BRASIL/MMA, 2014

Apesar da falta de informações da evolução do comportamento médio da distância percorrida pelos veículos no país, a suposição de que esta se manterá constante até 2020 não foge à realidade, pois, para a quilometragem média anual de um veículo aumentar substancialmente, o carro teria de ser dirigido mais horas por dia⁴¹ e, a menos que haja um aumento expressivo das regiões metropolitanas, não há por que, com o passar dos anos, as pessoas, na média, passem a percorrer maiores distâncias com o veículo.

Para corroborar esse fato, de acordo com IEA (2009), a utilização média de veículos leves nos países-membros da Agência Internacional de Energia é praticamente constante no período de 1970 a 2000, percorrendo entre 10 mil e 20 mil quilômetros por ano, dependendo do país. Países como Finlândia e Japão tiveram uma sensível redução na distância anual percorrida pela frota ao longo do tempo, ao passo que, na Dinamarca e nos Estados Unidos, as taxas aumentaram ligeiramente. França e Austrália apresentaram os valores de viagens por veículo que não variaram mais de 2 mil quilômetros por veículo por ano desde 1973.

Para o período pós-2020, assume-se que, diante da expectativa de envelhecimento da população do país (BRASIL/IBGE, 2013), a quilometragem média percorrida dos veículos leves e dos ônibus urbanos sofrerá redução gradual até o final do horizonte de análise. Essa premissa segue como base que, em 2050, a mobilidade da parcela da população com mais de 65 anos (23%) será de apenas 1/5 da mobilidade do resto da população.

⁴¹ A distância percorrida por um veículo poderia aumentar sem ser necessário dirigir mais horas por dia se o veículo fosse dirigido a velocidades superiores, o que, com o aumento dos congestionamentos, torna-se muito complicado. Outra forma de elevar a distância anual percorrida pela frota seria com o aumento de pessoas utilizando o mesmo veículo, o que também não é uma realidade, considerando a redução do tamanho médio das famílias no país ao longo dos anos.

5.1.1.3 EVOLUÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO

Há dois fatores variáveis que afetam a eficiência veicular no horizonte de projeção. O primeiro é o nível de congestionamentos, que reduz a velocidade média dos veículos, assim diminuindo a sua eficiência. Um dos principais estudos nesse tema foi realizado pelo Ipea, em parceria com a ANTP, que concluiu que existe uma relação não linear entre a velocidade e o consumo de combustível, conforme pode ser observado na Equação 21 (BRASIL/IPEA; ANTP, 1999).

$$\text{Consumo (l/km)} = 0,09543 + \frac{1,26643}{\text{Velocidade (km/h)}} - 0,00029 \cdot \text{Velocidade (km/h)} \quad (\text{Eq. 21})$$

Como a relação entre o consumo de combustível e a velocidade é não linear, utilizar tal relação de forma quantitativa exigiria informações bastante específicas. De forma qualitativa, uma fonte interessante de informação é o tempo de deslocamento ao trabalho, coletado na Pnad pelo IBGE. Tomando a série mais recente para a qual há disponibilidade contínua de dados, de 2001 a 2009, o tempo de deslocamento variou aproximadamente 8%, passando de 36 minutos em 2001 para 39 minutos em 2009, um incremento anual de aproximadamente 1% (BRASIL/IPEA, 2013).

O segundo fator a afetar a eficiência veicular é o progresso tecnológico – adoção de tecnologias eficientes –, que reduz o consumo de combustíveis: a EPE projeta aumento tendencial de 1% na eficiência dos veículos (BRASIL/EPE, 2014b) ao longo do período 2013-2050.

Dentre os aspectos incrementais para eficiência, estão incluídos fatores termodinâmicos, adequação do número e da funcionalidade das válvulas, injeção direta de combustível, redução do tamanho e do atrito do motor, gerenciamento do aquecimento do motor e sistemas de *start-stop*. Em especial, o sistema *start-stop*, cujo funcionamento se dá com o desligamento do motor de forma automática quando o veículo está parado e sua reiniciação instantânea quando o acelerador é acionado, reduz as perdas da marcha lenta (ATABANI et al., 2011), particularmente útil em engarrafamentos.

Tendo em vista que uma análise quantitativa sobre a relação congestionamento e eficiência veicular não seria possível, diante da complexidade da análise, estima-se que essas duas forças opostas (eficiência e congestionamentos) se anulariam. Portanto, a eficiência média dos veículos de passageiros é mantida constante ao longo do período de projeção.

5.1.1.4 EVOLUÇÃO DO FATOR DE OCUPAÇÃO

O fator de ocupação dos veículos de passageiros é expresso pela relação passageiro por veículo, sendo utilizado para obter o efeito atividade de cada modal. Para os veículos de passageiros, são utilizados os seguintes dados, estimados a partir de IPCC (2014):

- Veículos leves: 1,5 passageiro por veículo;
- Motocicletas: 1,0 passageiro por veículo;
- Ônibus: 40 passageiros por veículos;
- Micro-ônibus: 12 passageiros por veículo.

O nível médio de ocupação dos automóveis que transitam no espaço urbano e entre cidades é estimado como constante no período da simulação em virtude do rápido crescimento da taxa de motorização do país. Ou seja, no cenário REF, está previsto o crescimento do número de carros por pessoas, mantendo-se a quantidade de pessoas ocupando cada veículo.

5.1.2 TRANSPORTE DE CARGA

No caso do transporte rodoviário de cargas, o crescimento está atrelado à taxa de crescimento médio anual das mercadorias transportadas. Sua influência sobre a frota de veículos e, por consequência, sobre as vendas impacta diretamente todos os principais resultados do setor, gerando resultados diferentes dos constantes em Brasil/EPE (2014b), por exemplo. O cenário macroeconômico, nesse caso, tem influência sobre o resultado desta análise.

5.1.2.1 EVOLUÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS

A evolução da frota de veículos está atrelada à venda de veículos de cada classe e à curva de sucateamento considerada para veículos a ciclo diesel. A Tabela 73 indica a evolução da venda de veículos pesados. É importante salientar que neste estudo será considerado que 20% da frota de veículos comerciais leves são movidos a diesel considerados como parte da frota de veículos de transporte de cargas.

Tabela 73 – Histórico de Venda de Veículos do Transporte de Carga

Ano	Comerciais Leves	Comerciais Leves (20%)	Caminhões Semileves	Caminhões Leves	Caminhões Médios	Caminhões Semipesados	Caminhões Pesados
1957	0	0	0	7.967	0	139	0
1958	0	0	0	2.048	5.227	4.038	0
1959	466	93	0	0	6.847	3.253	0
1960	310	62	0	0	5.733	4.009	0
1961	4	1	0	0	3.777	1.937	0
1962	538	108	0	0	5.716	1.687	0
1963	1.489	298	0	0	3.816	2.161	0
1964	2.222	444	0	0	3.733	1.749	0
1965	979	196	0	180	4.147	2.432	0
1966	859	172	0	554	6.882	2.898	0
1967	648	130	0	624	7.682	1.701	0
1968	921	184	0	0	13.268	1.790	0
1969	914	183	0	2.699	11.956	2.220	0
1970	589	118	0	1.477	13.499	6.124	0
1971	504	101	0	1.123	12.580	8.068	0
1972	589	118	0	4.190	18.378	7.873	0
1973	573	115	0	7.476	24.322	7.132	0

Ano	Comerciais Leves	Comerciais Leves (20%)	Caminhões Semileves	Caminhões Leves	Caminhões Médios	Caminhões Semipesados	Caminhões Pesados
1974	545	109	0	7.558	22.258	12.232	0
1975	726	145	0	11.149	23.164	19.238	0
1976	1.449	290	0	21.721	24.278	20.763	0
1977	2.614	523	0	42.203	21.628	24.541	0
1978	4.315	863	0	30.998	24.690	22.685	0
1979	15.870	3.174	0	20.837	34.592	22.096	0
1980	19.686	3.937	0	22.466	36.888	21.996	0
1981	34.899	6.980	0	13.505	23.917	17.397	0
1982	43.983	8.797	0	13.765	15.698	10.754	0
1983	28.638	5.728	129	13.210	9.710	7.786	1.487
1984	29.183	5.837	550	17.404	10.026	9.671	2.537
1985	26.169	5.234	916	22.744	12.261	14.147	3.680
1986	27.421	5.484	2.380	31.088	13.757	18.109	4.901
1987	23.759	4.752	1.657	21.605	8.231	18.722	5.581
1988	36.042	7.208	1.417	20.399	7.693	18.722	6.538
1989	43.612	8.722	1.337	19.196	6.128	18.110	3.297
1990	36.415	7.283	1.517	12.612	12.449	7.039	7.569
1991	34.913	6.983	1.134	13.919	11.195	8.710	6.380
1992	29.732	5.946	337	7.620	5.733	5.646	6.258
1993	51.417	10.283	482	11.010	8.080	7.298	11.446
1994	60.132	12.026	355	15.482	10.574	10.374	15.541
1995	53.898	10.780	192	16.349	15.415	10.790	15.980
1996	43.521	8.704	72	11.547	10.033	8.979	11.504
1997	70.857	14.171	34	14.678	12.150	12.610	15.460
1998	76.465	15.293	197	13.856	11.941	14.095	12.680
1999	62.433	12.487	1.235	15.914	9.370	13.216	10.930
2000	83.062	16.612	2.940	22.634	10.720	19.088	13.710
2001	80.432	16.086	4.935	24.234	11.804	18.567	13.977
2002	64.341	12.868	7.304	19.427	9.907	15.276	13.972
2003	54.729	10.946	5.875	17.839	8.486	16.882	17.209
2004	66.247	13.249	7.577	20.137	8.642	22.364	24.285
2005	77.453	15.491	7.782	19.854	8.448	23.222	21.028
2006	82.954	16.591	7.795	19.329	9.538	20.416	19.180
2007	92.175	18.435	8.492	22.553	11.240	28.676	27.537
2008	124.639	24.928	8.981	25.385	11.888	37.321	38.774
2009	134.642	26.928	6.680	25.793	11.503	34.772	31.125
2010	172.001	34.400	7.310	34.333	14.173	49.980	51.898
2011	200.613	40.123	7.895	39.453	14.052	57.954	53.517
2012	197.206	39.441	6.522	33.343	11.852	45.881	41.549
2013	221.182	44.236	5.493	32.162	13.065	47.943	55.886

Fonte: ANFAVEA, 2015; MMA, 2014

A projeção das vendas de veículos pesados por cada classe, conforme descrito no item 1.2.2, é ajustada para atender o cenário macroeconômico previsto de crescimento das mercadorias transportadas. Nos anos de 2020 e 2045, há expectativa de queda na venda global de veículos. Essa queda ocorre por alguns fatores conjuntos, sendo o principal a elevada venda de veículos pesados realizada nos anos anteriores, aumentando significativamente a frota de veículos para transporte de carga em 2020 e 2045. Somam-se a isso a redução da participação do modal rodoviário no transporte de cargas e a estagnação do crescimento das *commodities* em relação ao período anterior nos anos em questão. Os resultados podem ser vistos na Figura 97. Destaca-se ainda que grande parcela das vendas é da classe pesada e semipesada.

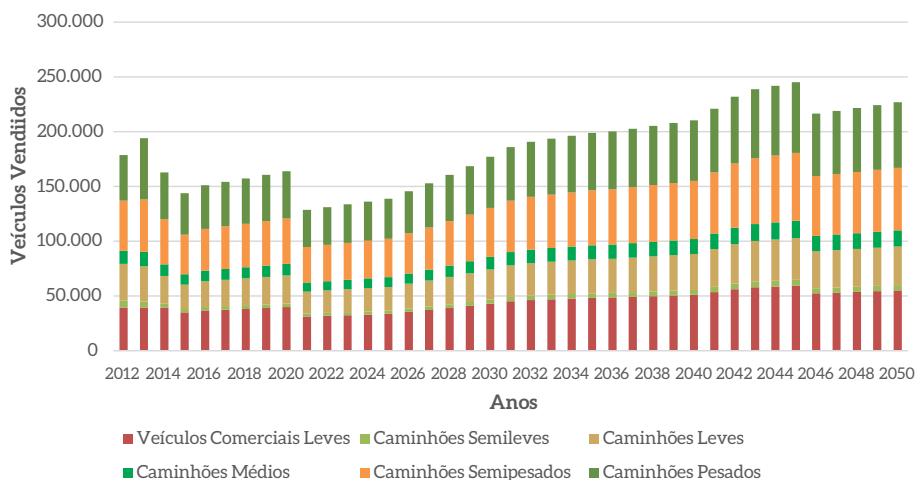


Figura 97 – Vendas de Veículos – Transporte de Carga

Fonte: Elaboração própria

De posse das projeções das vendas de veículos pesados no horizonte 2050 e assumindo que o perfil de sucateamento dos veículos permanecerá constante ao longo do período de análise, conforme apresentado na Figura 98, pode-se determinar a frota de veículos pesados.

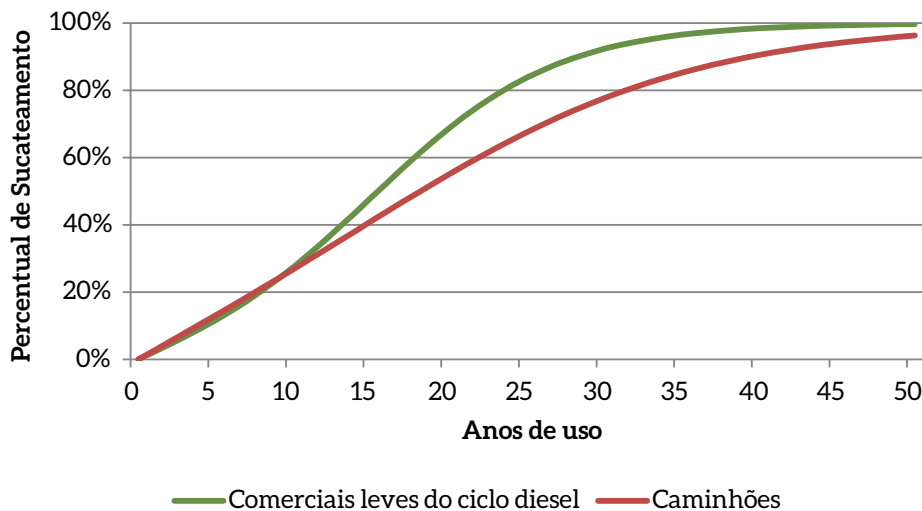


Figura 98 – Curva de Sucateamento de Autoveículos no Transporte de Carga

Fonte: BRASIL/MMA, 2014

A Figura 99 exibe o crescimento da frota de veículos pesados por categoria no horizonte 2050. Verifica-se que veículos semileves tendem a ter participação menor na frota, chegando ao ano de 2050 com 2% de participação. Tal fato se deve à competitividade comercial dessa classe de veículo, cujo custo-benefício torna-se competitivo com caminhões leves e comerciais leves.

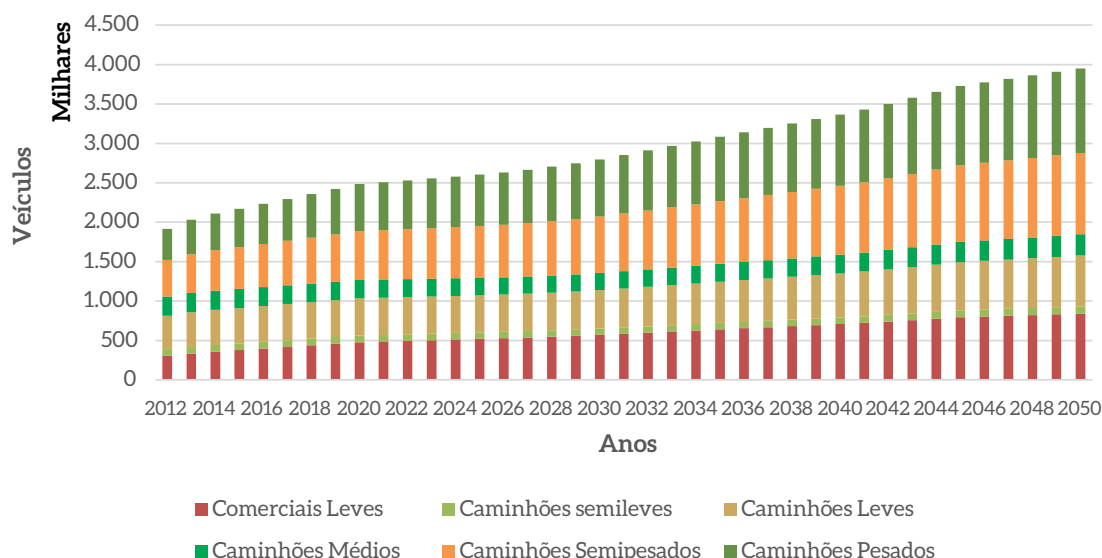


Figura 99 – Frota de Veículos de Carga

Fonte: Elaboração própria

Outro ponto importante é o aumento da proporção de veículos pesados e semipesados na frota, saindo de 45% de participação para 54%. Isso ocorre mesmo com a tendência do transporte por essas classes concorrer diretamente com outros modais, como ferroviário e hidroviário, indicando que o transporte de longas distâncias ainda será a base do transporte rodoviário de cargas. A frota total de veículos, que atualmente estima-se em 1,9 milhão de veículos, chegará a 2050 em 3,9 milhões, mostrando que o modal continuará em franca expansão, mesmo perdendo participação de mercado.

5.1.2.2 EVOLUÇÃO DA INTENSIDADE DE USO

O total de quilômetros rodados por ano (intensidade de uso) utilizado neste estudo toma como base os valores calculados pelo Ministério do Meio Ambiente (BRASIL/MMA, 2014). Tais dados foram calculados como forma de fazer os ajustes no consumo de diesel calculado. Ou seja, para que os valores de diesel consumido pelo setor, calculados no estudo, fossem condizentes com os valores mensurados pelo Balanço Energético Nacional, ajustes nessas variáveis foram feitos. O ano de 2012 neste estudo assume, portanto, os mesmos valores publicados pelo Ministério do Meio Ambiente, como exibido na Tabela 74. Para a projeção futura, considera-se que os valores de intensidade de uso são mantidos constantes.

Tabela 74 – Intensidade de Uso (Km/ano) – Veículos de Carga

Anos de uso do Veículo	Comerciais Leves Diesel	Caminhões Semileves e Leves	Caminhões Médios	Caminhões Semipesados e Pesados
0	10.000	32.290	56.155	58.952
1	19.600	63.875	110.518	116.415
2	19.200	63.171	108.727	114.927
3	18.800	62.466	106.936	113.438
4	18.400	61.762	105.145	111.950
5	18.000	61.058	103.355	110.461
6	17.600	60.353	101.564	108.973
7	17.200	59.649	99.773	107.484
8	16.800	58.944	97.982	105.996
9	16.400	58.240	96.191	104.507
10	16.000	57.535	94.400	103.019
11	15.600	56.831	92.609	101.530
12	15.200	56.127	90.818	100.041
13	14.800	55.422	89.027	98.553
14	14.400	54.718	87.236	97.064
15	14.000	54.013	85.446	95.576
16	13.600	53.309	83.655	94.087
17	13.200	52.605	81.864	92.599
18	12.800	51.900	80.073	91.110
19	12.400	51.196	78.282	89.622
20	12.000	50.491	76.491	88.133
21	11.600	49.787	74.700	86.644
22	11.200	49.083	72.909	85.156
23	10.800	48.378	71.118	83.667
24	10.400	47.674	69.327	82.179
25	10.000	46.969	67.537	80.690
26	10.000	46.265	65.746	79.202
27	10.000	45.560	63.955	77.713
28	10.000	44.856	62.164	76.225
29	10.000	44.152	60.373	74.736
30	10.000	43.447	58.582	73.248
31	10.000	42.743	56.791	71.759
32	10.000	42.038	55.000	70.270
33	10.000	41.334	53.209	68.782
34	10.000	40.630	51.418	67.293
35	10.000	39.925	49.628	65.805
36	10.000	39.221	47.837	64.316
37	10.000	38.516	46.046	62.828
38	10.000	37.812	44.255	61.339
39	10.000	37.107	42.464	59.851
40	10.000	36.403	40.673	58.362
41	10.000	35.699	38.882	56.873
42	10.000	34.994	37.091	55.385
43	10.000	34.290	35.300	53.896
44	10.000	33.585	33.509	52.408
45	10.000	32.881	31.719	50.919
46	10.000	32.177	29.928	49.431
47	10.000	31.472	28.137	47.942
48	10.000	30.768	26.346	46.454
49	10.000	30.063	24.555	44.965
50	10.000	29.359	22.764	43.477

Fonte: BRASIL/MMA, 2014

5.1.2.3 EVOLUÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO

Quanto à projeção do consumo específico, considera-se evolução de 1% ao ano em consonância com o valor apresentado em Brasil/EPE (2014b) em relação aos valores considerados para o ano de 2012, apresentados na Tabela 75.

Tabela 75 – Consumo Específico dos Veículos de Carga – 2012

Categoria	Consumo específico de diesel ($L_{\text{diesel}}/100\text{km}$)	Quilometragem por litro de diesel ($\text{km}/L_{\text{diesel}}$)
Caminhões semileves	11,0	9,1
Caminhões leves	18,0	5,6
Caminhões médios	18,0	5,6
Caminhões semipesados	29,0	3,4
Caminhões pesados	29,0	3,4

Fonte: BRASIL/MMA, 2014

Essa consideração sobre a evolução do consumo específico dos veículos deve-se ao fato de a inserção de novas tecnologias não ocorrer de forma sistemática. Apesar do potencial de economia do setor, o cenário REF prevê a manutenção do processo de evolução do transporte rodoviário de carga. Predominantemente, os caminhões de todas as classes permanecerão com o diesel como principal combustível. No cenário REF traçado, portanto, não haverá inserção de veículos híbridos pesados.

Cabe destacar que o pacote aerodinâmico disponível atualmente no mercado, do ponto de vista dos materiais empregados, apresenta considerável avanço tecnológico. Na verdade, o problema encontrado para inserção dessa solução está mais vinculado ao correto dimensionamento, que nem sempre é feito de forma adequada. Além disso, a maior parte dos veículos pesados que fazem uso do sistema não o faz de forma completa. Atualmente, utiliza-se, basicamente, apenas o sistema de carenagem na parte superior da cabine, ficando de fora as adequações no semirreboque, por exemplo. Quanto às soluções de redução de tempo ocioso, como o sistema de partida e parada e os sistemas inteligentes para adaptação do uso de forma otimizada, não se considera sua entrada nesse cenário. A Figura 100 mostra a evolução do consumo específico de cada classe de veículo ao longo do tempo até o ano de 2050.

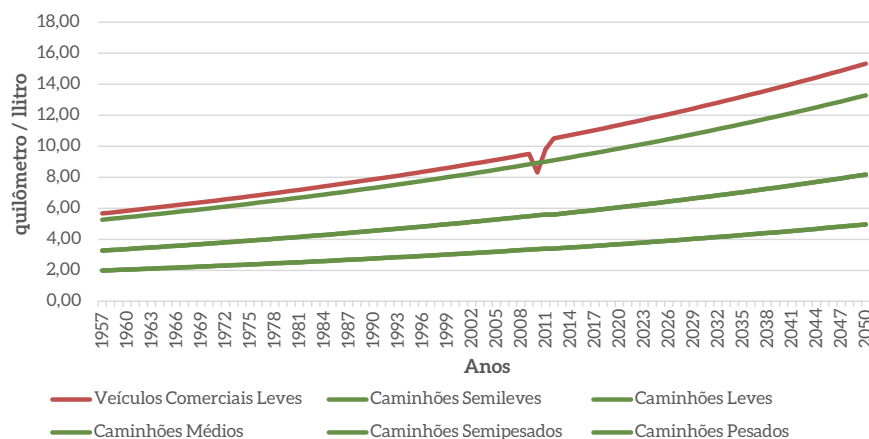


Figura 100 – Projeção do Consumo Específico dos Veículos Pesados

Fonte: Elaboração própria

A evolução das eficiências se dá de forma gradativa, à exceção dos anos de 2010 e 2011, no caso de veículos leves movidos a diesel. Um dos principais motivos para ruptura dessa tendência foi a implantação da fase P5 do Programa de Emissões de Controle Veiculares (Proconve). Nessa fase, mais especificamente entre os anos de 2009 e 2010, houve redução dos fatores de emissão requeridos, em especial nos índices NOx, chegando à redução de 50% (BRASIL/MMA, 2014). Como esse fator de emissão tem impacto direto sobre a eficiência, seus efeitos foram sentidos nos anos subsequentes.

5.1.2.4 EVOLUÇÃO DO FATOR DE OCUPAÇÃO

A quantidade de toneladas transportadas por veículo, ou fator de ocupação, tem impacto nos valores finais de toneladas-quilômetros úteis transportadas, bem como na eficiência do modal. Neste estudo, são considerados valores típicos médios de toneladas transportadas por classe de veículos. Os valores considerados são mostrados na Tabela 76 e são replicados para todos os anos da série, ou seja, até 2050.

Tabela 76 – Carga Média (em Toneladas) Transportada por Veículo de Carga

Faixa de Idade	menor que 2 anos	menor que 2 anos	entre 6 a 10 anos	entre 11 e 15 anos	mais que 15 anos
Comerciais leves	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Caminhões semileves	3,8	3,4	2,9	3	2,7
Caminhões leves	3,6	6,1	5,8	8,9	9
Caminhões médios	9,8	10,2	10	10,9	11,6
Caminhões semipesados	12,8	12,2	12,7	13,6	13,1
Caminhões pesados	27,2	25,9	24,8	23,9	23,1

Fonte: BRASIL/MMA, 2014; TRUK, 2004

A partir desses valores e da projeção da frota calculada, pode-se estimar a evolução da tonelada média transportada por veículo de todo o sistema rodoviário de carga, conforme detalhado na metodologia apresentada na Figura 88. Nota-se, na Figura 101, que, apesar de as toneladas transportadas por veículos serem mantidas constantes, como haverá mudança na participação das classes na frota, haverá evolução da tonelada por veículo média do modal.

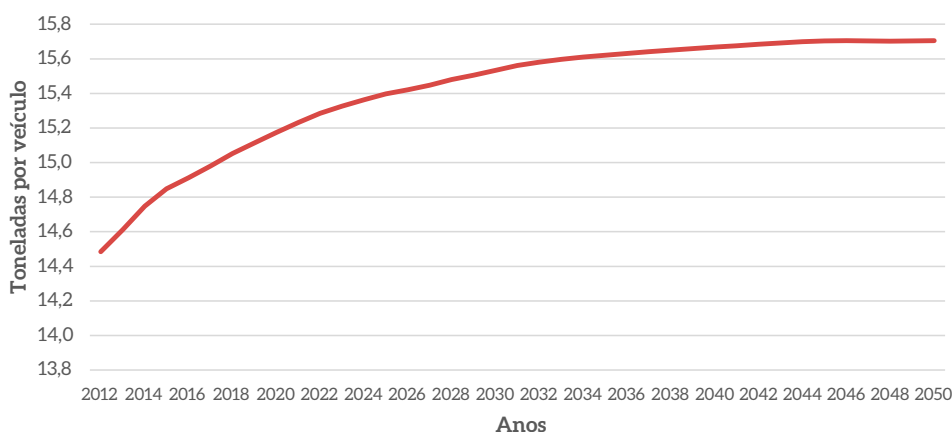


Figura 101 – Toneladas Médias Transportadas por Veículos

Fonte: Elaboração própria

Outro importante fator de correção usado neste estudo é o fator de carregamento, calculado, no ano-base, por meio de processo iterativo. Considera-se nesse cálculo o valor percentual de quilômetros rodados com o veículo carregado necessários para se obter a quantidade de toneladas-quilômetros úteis transportada no referido ano. O valor obtido é de 38%. Ou seja, em 38% dos quilômetros rodados, o veículo está efetivamente com carga. Para os anos posteriores, no cenário REF, considera-se que não há evolução desse valor, sendo necessárias ações específicas com esse intuito para uma eficiência maior do setor.

5.2 MODAL FERROVIÁRIO

5.2.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

Para o transporte de passageiros, de forma similar a Brasil/EPE (2014b), são considerados investimentos na ampliação dos sistemas sobre trilhos de alta e média capacidade, como metrô, trens urbanos, VLT e monotrilhos, bem como melhorias na qualidade e na capacidade de transporte dos sistemas já em operação. Também é esperado que o transporte interurbano de passageiros pelo modal ferroviário cresça, tendencialmente, em função da implantação dos TAV e dos trens regionais que ligam cidades próximas.

No entanto, essas políticas não devem ocasionar grandes impactos no sistema rodoviário de transporte de passageiros visto que o sistema ferroviário é responsável pela movimentação de menos de 2% da população nas principais regiões metropolitanas, cidades e aglomerados urbanos.

5.2.1.1 EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE PASSAGEIROS-QUILÔMETRO

No cenário REF, considerando-se a ampliação, modernização e criação das novas linhas e estações previstas para o sistema metroviário, em consonância com as previsões de investimento no setor (BRASIL/ANTT, 2014g; BRASIL/EPL, 2014b), estima-se crescimento acumulado de 300% até 2050, com o total de passageiros-quilômetro passando de 28 bilhões/ano, em 2012, para 90 bilhões/ano, em 2050. A Tabela 77 mostra as estimativas do indicador de atividade desse segmento para o Brasil.

Tabela 77 – Evolução PKM Ferroviário

Ano	2013	2020	2030	2040	2050
pkm metroviário (10 ⁹)	28	30	50	75	90

Fonte: Elaboração própria

5.2.1.2 EVOLUÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO

Para o cenário REF, estima-se o aumento da eficiência do sistema metroviário, no horizonte 2050, de 8% ao ano, em função da entrada de novos sistemas de VLT e TAV, passando de 0,07 KWh/pkm, em 2013, para 0,09 kWh/pkm, em 2050. Destaca-se que, neste estudo, considera-se que a entrada dos sistemas VLT e TAV acarretará no maior consumo específico do sistema ferroviário de passageiros. Entretanto, estes sistemas permitirão a mudança modal, em especial do modal rodoviário, acarretando em menor consumo energético para o setor transportes.

5.2.2 TRANSPORTE DE CARGA

Para a modelagem da carga transportada e do consumo de energia pelo modal ferroviário, é necessária a adoção de premissas que sirvam de base para a simulação. As principais informações para a projeção do cenário REF seguem os dados coletados para 2013 do relatório anual de acompanhamento das concessões ferroviárias disponibilizado por Brasil/ANTT (2013b), por concessionária, referentes às variáveis de base da simulação:

- Percurso médio por vagão: o relatório da ANTT utiliza dados providos por cada concessionária de ferrovia para informar a distância média percorrida de um vagão a cada mês de operação;
- Carga útil por vagão: cada concessionária tem um fator de carga que representa a quantidade média de toneladas úteis – ou seja, desconsidera a massa do vagão – transportadas;
- Frota de vagões: informa a quantidade de vagões efetivamente em operação por concessionária;
- Consumo específico: o relatório apresenta dados mensais por concessionária de consumo específico, medido em litros por TKU.

Assim, os relatórios anuais da ANTT sobre transporte de carga ferroviário são responsáveis por fornecer a maior parte dos dados utilizados para a construção das projeções do segmento. Como os dados – com exceção do referente à extensão da linha em operação – são providos mês a mês, é necessária a ponderação para padronizá-los para o formato anual. Vale frisar que todos os cálculos foram realizados por concessionária.

Dessa forma, os dados de distância média percorrida por vagão e total de TKU por concessionária da ANTT (BRASIL/ANTT, 2013b), para o período de janeiro a dezembro de 2013, são somados, enquanto, para o número de vagões, tonelada útil por vagão e consumo específico, são realizadas médias dos valores mensais. A informação do total de tonelada-quilômetro útil transportada por concessionária serve como base para a determinação do fator de correção, que estima a diferença percentual da tonelada real transportada e da tonelada útil por vagão. A Tabela 78 resume as informações para o ano de 2013, de acordo com os cálculos descritos.

Tabela 78 – Dados de 2013 para a Metodologia do Modal Ferroviário

Concessionária	Extensão da linha (km)	Percurso médio anual (km)	Quantidade de vagões	TU transportada por vagão	mil TKU	L/mil TKU	Consumo em L	Fator de Correção
ALLMN	617	47.556	5.223	230	20.593.900	2,37	48.859.028	0,36
ALLMO	1.945	23.799	1.268	305	20.587.000	15,94	328.071.001	2,23
ALLMP	1.945	9.762	3.206	141	3.912.200	14,04	54.907.727	0,89
ALLMS	7.265	33.890	12.258	154	15.788.700	9,29	146.650.709	0,25
EFC	892	186.204	12.738	843	101.010.400	2,10	211.616.788	0,05
EFVM	905	104.720	18.826	631	72.009.300	2,78	200.245.862	0,06
FCA	8.066	125.994	13.115	147	17.789.400	11,17	198.633.476	0,07
FERROESTE	248	50.947	73	352	153.300	13,82	2.118.351	0,12
FNS	2.200	81.976	652	403	2.377.400	4,10	9.755.265	0,11
FTC	164	21.337	373	724	238.800	6,72	1.604.935	0,04
MRS	1.674	73.180	19.364	568	61.467.500	4,41	270.764.338	0,08
TLSA	4.207	18.246	1.841	55	534.400	15,57	8.321.944	0,29

Fonte: BRASIL/ANTT, 2013b

5.2.2.1 EVOLUÇÃO DA FROTA DE VAGÕES

A premissa adotada para a evolução da frota no cenário REF é que a quantidade de vagões deve aumentar de acordo com um crescimento previsto para a carga bruta. Desse modo, utilizando as projeções macroeconômicas deste estudo, são coletadas as taxas de crescimento disponibilizadas para todas as *commodities* transportadas.

Tendo em vista que em Brasil/ANTT (2013b) é apresentada a quantidade de cada *commodity* transportada por concessionária, pode-se estimar a expansão da carga transportada pelas ferrovias. A diferença entre os valores absolutos de tonelada transportada de todos os produtos no horizonte 2050 representa a taxa de crescimento geral da carga transportada do segmento. Esse valor percentual de crescimento geral é então aplicado sobre a quantidade de vagões, de modo a calcular a frota ano a ano até 2050, conforme apresentado na Tabela 79:

Tabela 79 – Quantidade de Vagões por Concessionária

Concessionária	2013	2020	2030	2040	2050
ALLMN	5.223	6.060	7.290	8.494	9.523
ALLMO	1.268	1.511	1.639	1.889	2.183
ALLMP	3.206	3.726	4.593	5.389	6.024
ALLMS	12.258	14.221	17.325	20.297	22.805
EFC	12.738	15.443	16.525	19.153	22.395
EFVM	18.826	22.702	24.624	28.604	33.349
FCA	13.115	15.214	18.514	21.727	24.515
FERROESTE	73	84	101	118	132
FNS	652	764	910	1.060	1.192
FTC	373	446	650	783	852
MRS	19.364	23.331	25.445	29.598	34.507
TLSA	1.841	2.160	2.688	3.210	3.671
Total	88.936	105.663	120.306	140.321	161.147

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de BRASIL/ANTT, 2013b

5.2.2.2 EVOLUÇÃO DA INTENSIDADE DE USO

Considera-se que o aumento da distância média a ser percorrida por vagão será proporcional à expansão prevista para a extensão da linha ferroviária, de modo geral. Dessa forma, o crescimento total é dividido pela quantidade de anos para se obter uma taxa de expansão linear até 2050. Cada concessionária percorrerá uma distância média maior a cada ano, proporcional a essa taxa de expansão.

Cabe destacar que, no período compreendido entre 1991 e 1998, as ferrovias estatais no Brasil foram divididas em malhas independentes e, posteriormente, foram objeto de desestatização por meio de contratos de concessão que conferiam às respectivas empresas concessionárias o direito de exploração com exclusividade de suas respectivas malhas (ALL, 2013).

Atualmente, mais de 96% das malhas operam por concessões do governo brasileiro (ALL, 2013). Cada concessionária é responsável pela operação em um determinado trecho da malha, conforme discutido no capítulo 1 deste estudo. Pelas licitações e obras destinadas à expansão da infraestrutura do transporte ferroviário, é previsto um aumento geral na extensão das malhas regionais. No entanto, não há como prever se haverá mudanças nos contratos de concessão que influenciarão significativamente a participação de cada empresa nos direitos de operação. Dessa forma, considera-se que o percentual de participação de cada concessionária se manterá, aumentando apenas os trechos de concessão de cada uma de maneira proporcional à expansão geral da linha férrea.

Assim, por conta de investimentos de iniciativa pública e privada na infraestrutura da malha ferroviária, é esperado aumento da linha ferroviária para promover o acesso a outras regiões, assim expandindo as operações do modal no transporte de *commodities*. De acordo com o relatório de demanda de energia, que compõe o Plano Nacional de Energia 2050 e contempla o portfólio de projetos inseridos no PAC, PIL e PNLT, é previsto que a malha chegue a uma extensão superior a 45 mil km até 2030 e, após esse período, em ritmo mais lento, alcance os 60 mil km em 2050 (BRASIL/EPE, 2014b). Isso representa crescimento de 49% da linha no período 2013-2030 e de 33% entre 2030-2050. Desse modo, de 2013 a 2030, considera-se uma taxa de crescimento anual de 2,9% da malha e, após esse período, a taxa de crescimento é de 1,7%, conforme apresentado na Tabela 80.

Tabela 80 – Percurso Médio do Vagão (em Km) por Concessionária

Concessionária	2013	2020	2030	2040	2050
ALLMN	47.556	57.227	74.550	97.117	126.515
ALLMO	23.799	28.639	37.308	48.601	63.313
ALLMP	9.762	11.747	15.303	19.935	25.970
ALLMS	33.890	40.782	53.127	69.209	90.159
EFC	186.204	224.069	291.897	380.257	495.364
EFVM	104.720	126.015	164.161	213.854	278.590
FCA	125.994	151.615	197.511	257.299	335.186
FERROESTE	50.947	61.307	79.866	104.042	135.536
FNS	81.976	98.646	128.507	167.408	218.083
FTC	21.337	25.676	33.448	43.573	56.763
MRS	73.180	88.061	114.718	149.445	194.683
TLSA	18.246	21.956	28.603	37.261	48.540
Geral	777.611	935.741	1.218.998	1.588.001	2.068.703

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de BRASIL/ANTT, 2013b; BRASIL/EPE, 2014b

5.2.2.3 EVOLUÇÃO DO FATOR DE OCUPAÇÃO

Para a projeção do cenário REF, leva-se em conta que a quantidade de toneladas úteis transportadas em média por vagão, por concessionária, permanecerá constante até 2050. Ou seja, a premissa adotada é de que os vagões não apresentarão incrementos significativos na capacidade de carregamento, apresentada na Tabela 78.

Tendo em vista que a tonelada real transportada pelas concessionárias é, em sua maioria, inferior à tonelada útil dos vagões, há a necessidade de aplicar um fator de correção para cada concessionária, o que representa o ajuste da quantidade de TKU transportada.

Pela projeção dos fatores de correção, dada a inviabilidade de fazer o cálculo para anos anteriores a 2009, devido ao fato de algumas empresas não terem surgido nos contratos de concessão até então, não foi possível identificar um padrão de comportamento para o fator de correção. Contudo, como em muitos anos os fatores encontram-se em uma mesma faixa, é adotada a premissa de que o fator de correção por concessionária será mantido igual ao ano de 2013 ao longo do horizonte 2050.

5.2.2.4 EVOLUÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO

O transporte ferroviário se configura como um dos modais com maior eficiência, o que enfatiza sua importância para o transporte de longas distâncias. Para o cenário REF, são levantadas as medidas que se enquadram como tendências, no que diz respeito à adoção de tecnologias disponíveis para a frota, para o horizonte 2050, de modo que haja redução do consumo de combustível por carga transportada.

Dentre as técnicas e tecnologias disponíveis levantadas, consideram-se apenas a implementação de bitola larga e o traçado geométrico otimizado. Tais técnicas acarretam redução das passagens de nível críticas e maior eficiência no deslocamento, no tocante ao aumento da velocidade operacional no transporte, sem que haja substituição do material utilizado ou emprego de uma nova tecnologia. Cumpre destacar que tais premissas encontram-se em consonância com o relatório *Demanda de Energia 2050* (BRASIL/EPE, 2014b).

Assim, considera-se que as locomotivas responsáveis pelo transporte de carga permanecerão operando durante o horizonte de tempo proposto com motor a diesel. Assume-se essa tendência, que é o tipo de tração predominante no modal ferroviário brasileiro e considerado relativamente eficiente sob o ponto de vista de consumo de combustível, quando comparado a outros modais.

Por conta de fatores relacionados à evolução na eficiência do transporte de cargas ferroviário devido aos fatores tecnológicos citados acima e considerando a exclusividade do óleo diesel nessa atividade, adotou-se como premissa que o consumo específico em litros por tonelada-quilômetro transportada sofrerá redução de 1% ao ano, no horizonte 2050, de forma similar a EPE (2014), conforme apresentado na Tabela 81.

Tabela 81 – Consumo Específico (em L/mil TKU) por Concessionária

Concessionária	2013	2020	2030	2040	2050
ALLMN	2,37	2,21	2,00	1,81	1,64
ALLMO	15,94	14,85	13,43	12,15	10,99
ALLMP	14,04	13,08	11,83	10,70	9,68
ALLMS	9,29	8,66	7,83	7,08	6,40
EFC	2,10	1,95	1,77	1,60	1,44
EFVM	2,78	2,59	2,34	2,12	1,92
FCA	11,17	10,41	9,41	8,51	7,70
FERROESTE	13,82	12,88	11,65	10,53	9,53
FNS	4,10	3,82	3,46	3,13	2,83
FTC	6,72	6,26	5,67	5,12	4,63
MRS	4,41	4,11	3,71	3,36	3,04
TLSA	15,57	14,51	13,13	11,87	10,74
Geral	8,52	7,95	7,19	6,50	5,88

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da BRASIL/ANTT, 2013b; BRASIL/EPE, 2014b

5.3 MODAL AÉREO

5.3.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

5.3.1.1 EVOLUÇÃO DO FATOR DE OCUPAÇÃO

Conforme descrito no capítulo 1, a taxa de ocupação das aeronaves é uma variável indiretamente relacionada à evolução do ASK porque quanto maior a taxa de ocupação de uma aeronave, menor é a necessidade de ASK a ser ofertada. O *benchmarking* dessa taxa está em torno de 80% para voos nacionais e 85% para voos internacionais.

Para o cenário REF, a taxa de ocupação cresce em função dos recentes investimentos realizados pelas companhias aéreas, visando ao aumento da eficiência operacional e ao aumento da rentabilidade do capital. Como premissa desse cenário, a estratégia operacional das companhias aéreas é mantida, com alteração da taxa de ocupação média (considerando voos internacionais e domésticos) do patamar de 77% em 2012 (73% voos domésticos e 80% voos internacionais) para um patamar de 80% em 2050 (79% voos domésticos e 82% voos internacionais), cujo resultado equivale ao *benchmarking* da indústria nos padrões atuais.

Tabela 82 – Taxa de Ocupação das Aeronaves

Ano	2013	2020	2030	2040	2050
Taxa de ocupação (pkm/ASK)	78%	80%	80%	80%	80%

Fonte: Elaboração própria

5.3.1.2 EVOLUÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO

O parâmetro de intensidade energética do setor de transporte aéreo de passageiros reflete os ganhos em termos de eficiência energética cujo efeito seja realizado sobre a variação de consumo de querosene de aviação, medido em litros por assentos-quilômetro. A projeção do parâmetro de intensidade energética na aviação segue como base o valor obtido para o ano de 2012, conforme exibido na Equação 22:

$$I_{2012} = 38.530 \text{ ASK/m}^3 \text{ (Eq. 22)}$$

No caso do cenário REF, o indicador de eficiência é composto por ganhos operacionais e tecnológicos. Dessa forma, o consumo em litros por passageiros-quilômetro evolui do patamar de 0,026 em 2012 para 0,016 em 2050, como exibido na Tabela 83. Portanto, a eficiência cresce em média 1,3% a.a.

Tabela 83 – Eficiência Energética das Aeronaves

Ano	2013	2020	2030	2040	2050
Eficiência (litros/ASK)	0,025	0,025	0,022	0,019	0,016

Fonte: Elaboração própria

5.3.1.3 EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE ASSENTOS-QUILÔMETRO

Para o cálculo do ASK, conforme apresentado na metodologia, o número de passageiros-quilômetro transportados cresce em função da taxa de crescimento do PIB, multiplicado pela elasticidade-renda da demanda. Para o ano-base 2012, o setor aéreo apresentou 204,5 bilhões de passageiros-quilômetro transportados, enquanto a elasticidade-renda nos últimos dez anos variou entre 2,5 e 3,0, segundo testes estatísticos.

Contudo, para o horizonte 2050, não seria adequado assumir como tendência que a demanda de passageiros-quilômetro transportados poderia manter o mesmo ritmo de desempenho de duas a três vezes o crescimento da economia. Dessa forma, a hipótese adotada foi uma elasticidade-renda de 2,0 até 2030, com arrefecimento para 1,5 entre 2030-2050. Ou seja, este estudo considera o aumento acentuado da atividade do setor (ASK), no horizonte 2030, atingindo, na média, 5,9% ao ano no período, fruto do maior acesso a crédito da população, em especial de consumidores das classes C e D, e a criação de novas rotas e horários de voos. Para o período 2030-2050, esse processo de evolução da atividade do setor torna-se menos acentuado, alcançando, na média, 3,1% ao ano no período, resultado de uma maior estabilização do setor.

O indicador de passageiros-quilômetro transportados, aliado à premissa da taxa de ocupação das aeronaves, traz como resultado o número de assentos-quilômetro ofertados (ASK). Sendo assim, a partir das premissas adotadas, a evolução do ASK no horizonte 2012-2050 é apresentada na Tabela 84.

Tabela 84 – Assentos-Quilômetro Ofertados

Ano	2013	2020	2030	2040	2050
ASK (Bilhões)	270	427	718	1.005	1.331

Fonte: Elaboração própria

5.3.2 TRANSPORTE DE CARGA

5.3.2.1 EVOLUÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO

Quanto ao transporte aéreo de carga, a premissa é conservadora, assumindo-se que a intensidade energética permanecerá constante em 40,7 litros por tonelada-quilômetro transportada.

5.3.2.2 EVOLUÇÃO DO NÍVEL DE ATIVIDADE

Para projeção do número de toneladas-quilômetro transportadas (TKU), adota-se como premissa que esse indicador seria função da dinâmica do comércio internacional de exportações e importações. Assim, este trabalho considera que a taxa de crescimento da atividade de carga doméstica seguirá o comportamento das exportações, ou seja, assume-se a mesma taxa de variação para atividade doméstica de carga em relação às exportações. O crescimento da atividade internacional de carga, por sua vez, está vinculado às importações. A atividade total do modal representa o somatório das atividades de carga doméstica e internacional. A Tabela 85 apresenta a taxa de crescimento das importações e das exportações brasileiras para o cenário REF.

Tabela 85 – Exportações e Importações Brasileiras

Período	Taxa de Crescimento Exportações	Taxa de Crescimento Importações
2015	2,3%	2,8%
2020	0,4%	0,1%
2025	-1,6%	-2,8%
2030	0,0%	-0,4%
2035	1,0%	1,1%
2040	1,7%	1,9%
2045	2,1%	2,4%
2050	2,3%	2,6%

Fonte: HADDAD, 2015

5.4 MODAL HIDROVIÁRIO

5.4.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

Conforme discutido no capítulo 1 deste estudo, as principais vias de transporte hidroviário de passageiros concentram-se na região Norte do país e no estado do Rio de Janeiro. Em 2013, a Antaq mapeou 313 linhas de navegação de passageiros na Região Amazônica do Brasil. No total, em 2012, foram transportados 7.091.056 de passageiros com uma distância média percorrida de 242,13 km. Já o transporte de passageiros na região metropolitana do estado do Rio de Janeiro obteve, em 2012, o fluxo de 28.689.105 de passageiros, porém realizado em uma distância média de 6,11 km (BRASIL/ANTAQ, 2013c; RJ/IPP, 2014).

No total, foram transportados 1.892.141.994 passageiros-quilômetro (pkm) em território nacional, considerando que não há dados consolidados sobre outras regiões do país e, como premissa, que as outras localidades onde há transporte hidroviário ou marítimo de passageiros têm números pouco expressivos para fazer diferença significativa no total de pkm.

5.4.1.1 EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE PASSAGEIROS TRANSPORTADOS

Para o cenário REF, não se considera análise concorrencial entre os modais para definição da quantidade futura de passageiros-quilômetro transportados para o transporte de passageiros hidroviários e marítimos. Assim, o crescimento do número de passageiros transportados pelo modal é vinculado ao crescimento populacional.

Devido à relevância do transporte de passageiros nas regiões Norte do Brasil e metropolitana do estado do Rio de Janeiro, são considerados os crescimentos populacionais, conforme a Figura 102. Destaca-se que, para o período 2012-2030, a informação populacional está de acordo com Brasil/IBGE (2013). A partir de 2031, tendo em vista que a projeção do crescimento populacional realizada pelo IBGE não desagrega regiões e estados da Federação, considera-se o mesmo crescimento percentual derivado das curvas de crescimento populacional apresentadas na Figura 92 para as regiões Norte e metropolitana do Rio de Janeiro.

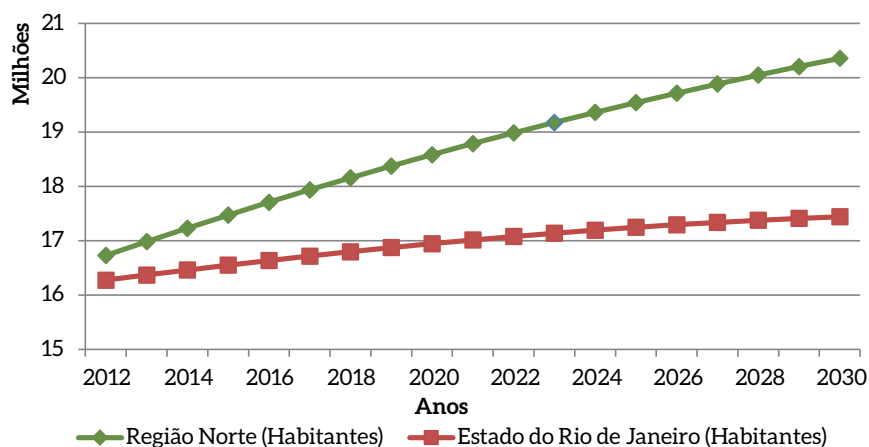


Figura 102 – Crescimento Populacional da Região Norte e do Estado do Rio de Janeiro

Fonte: BRASIL/IBGE, 2013

Cabe destacar que o crescimento do transporte aquaviário de passageiros deve ser calibrado com o limite de expansão previsto pelos planos governamentais. O Plano Hidroviário Estratégico (PHE), elaborado pelo Ministério dos Transportes, prevê uma taxa de crescimento anual em número de passageiros de 1,70% até 2031 na Região Amazônica, desde que haja investimentos na ampliação das hidrovias navegáveis, incluindo obras de derrocamento, dragagem, barragem, regularização dos rios e sinalização.

Além disso, a renovação da frota, considerando ainda o *retrofit* das embarcações atuais de passageiros, e a adequação dos terminais de passageiros são requisitos para que se possa alcançar crescimento de cerca de 37% no período entre 2012 e 2031. Portanto, este estudo considera o cenário de crescimento do número de passageiros transportados, conforme apresentado na Tabela 86, assumindo-se o limite superior de 1,7% a.a., no caso de algum crescimento anual populacional ultrapassar o crescimento estimado pelo PHE.

Tabela 86 – Projeção de Passageiros Transportados no Transporte Aquaviário

Anos	Transporte de Passageiros		
	Região Norte	Estado do RJ	Total
2013	7.198.429	28.856.923	36.055.351
2020	7.876.396	29.874.743	37.751.140
2030	8.628.550	30.746.451	39.375.001
2040	8.822.921	31.439.064	40.261.985
2050	8.753.100	31.190.267	39.943.367

Fonte: Elaborado a partir de BRASIL/ANTAQ, 2012b, 2013b, 2013d

5.4.1.2 EVOLUÇÃO DA INTENSIDADE DE USO

No cenário REF, os quilômetros percorridos pelas embarcações, ao longo das 317 linhas avaliadas, são considerados constantes no período entre 2012 e 2050, mantendo-se nos mesmos valores apresentados pela Antaq (2013c) e pelo IPP (2014). Essa consideração decorre da ausência tanto de informações acerca da mudança de destino e origem nas cidades das linhas existentes quanto de indicação acerca da criação de novas linhas de navegação de passageiros nas duas regiões analisadas.

5.4.1.3 EVOLUÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO

Para determinação do consumo de combustíveis por passageiro-quilômetro, são seguidos os históricos de consumo e pkm, apresentados no capítulo 1 deste estudo. O histórico de dados disponíveis de consumo de combustível, tanto de óleo diesel marítimo quanto de óleo combustível, se iniciou em 1996, de acordo com os Balanços Energéticos Nacionais da EPE, conforme a Figura 103. O volume correspondente ao óleo combustível é referente ao transporte de cabotagem marítima. Por sua vez, o óleo diesel marítimo se refere ao transporte em hidrovias interiores.

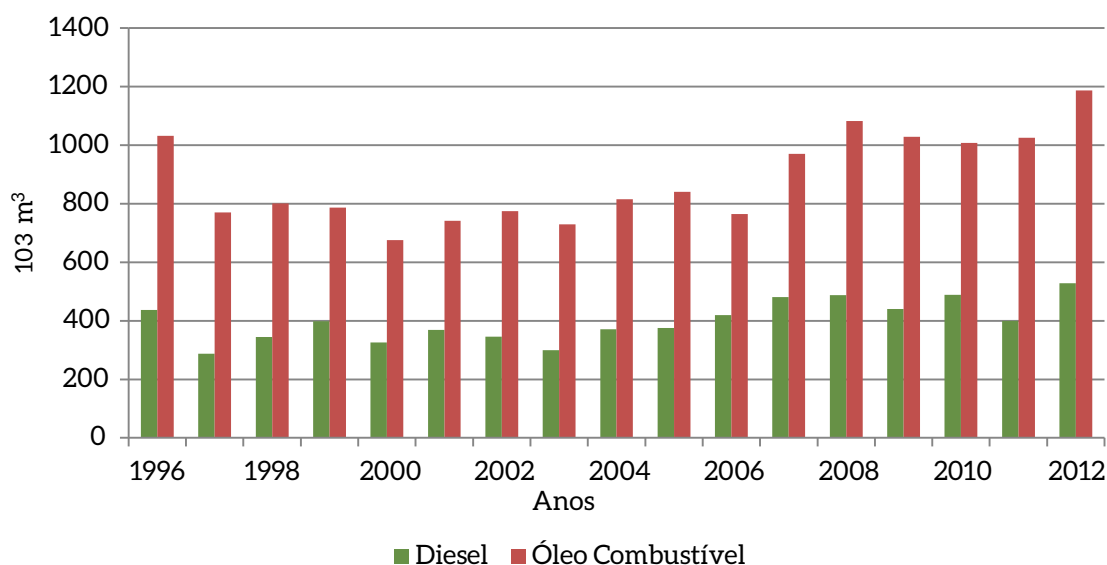


Figura 103 – Consumo de Óleo Diesel e Óleo Combustível no Segmento Hidroviário

Fonte: BRASIL/EPE, 2014a

No transporte de passageiros, a dificuldade limita-se ao mapeamento do transporte na Região Amazônica, que somente ocorreu com estudo encomendado pela Antaq em 2013 – *Caracterização da Oferta e da Demanda do Transporte Fluvial de Passageiros na Região Amazônica*. A EPE, em seu relatório do setor de transportes, evidencia a falta de informações como limitação dos resultados encontrados. De fato, o resultado da EPE para 2010, por exemplo, que também inclui o transporte de passageiros da travessia de barca da região metropolitana no estado do Rio de Janeiro, indica a movimentação de passageiros de 895 milhões de pkm, o que é menos da metade da quantidade de pkm dos anos 2011 e 2012, apresentados no capítulo 1 deste estudo, de 1.893 milhões de pkm e 1.892 milhões de pkm.

Levando em consideração a demanda de óleo diesel marítimo para transporte de passageiros divulgada pela EPE, entre 1996 e 2010, o transporte de passageiros foi responsável, na média, por 13,73% de todo o diesel de uso hidroviário consumido dentro do território nacional (BRASIL/EPE, 2012a). Como a EPE divulgou o volume consumido em 2011 e 2012 no transporte hidroviário sem discriminar o transporte de passageiros, ao se considerar a mesma média supracitada, é gerado o consumo de óleo diesel marítimo de 54,9 e 72,6 mil m³ nos correspondentes anos. De posse, então, desses valores, volume de combustível e pkm, a Figura 104 apresenta o comportamento de consumo específico de óleo diesel por 100 passageiros-quilômetro desde 1996.

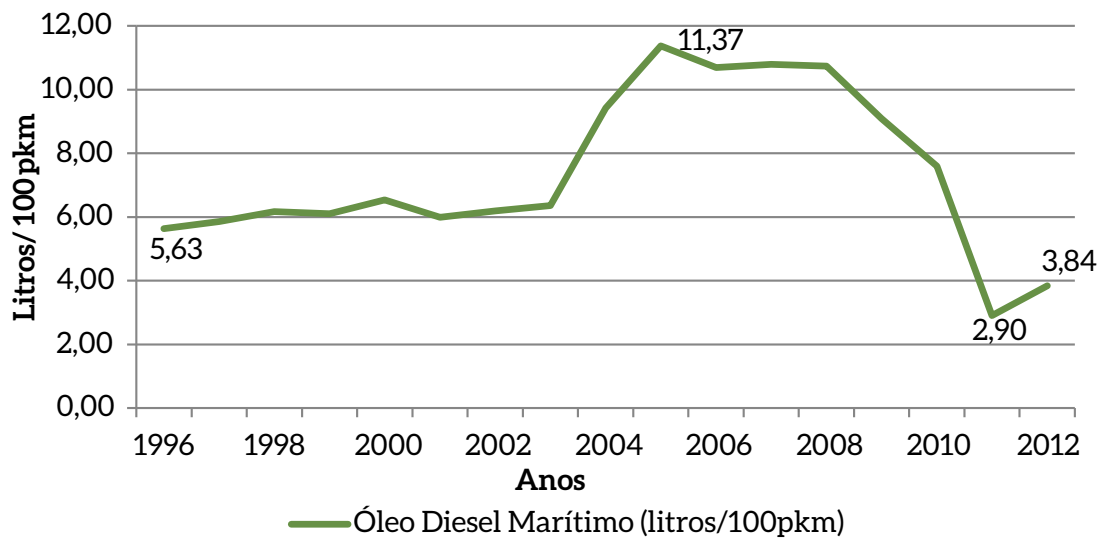


Figura 104 – Consumos Específicos de Óleo Diesel no Transporte Aquaviário de Passageiros

Fonte: Elaborado a partir de BRASIL/ANTAQ, 2013c; RJ/IPP, 2014

Dessa forma, para o cenário REF, é considerada a média do período 1996-2012 de 7,37 litros/100pkm. Esse valor é tratado como constante ao longo da análise em virtude da dificuldade de se identificarem possíveis ações de eficiência energética dentro do cenário que possam reduzir o consumo. Ademais, a incerteza vinculada ao aumento abrupto do consumo a partir de 2004, cessado em 2008, e a redução significativa do consumo específico verificada a partir de 2009, até o valor de 2,90 litros/100pkm, em 2011, acompanhado, em seguida, de aumento de 32,4%, em 2012, dificultam a análise tendencial do setor. Assim, de modo a minimizar possíveis erros, a premissa adotada é de que a média do período (1996-2012) retrata de forma adequada o consumo por pkm atual.

5.4.2 TRANSPORTE DE CARGA

Para o cálculo da tonelada-quilômetro útil transportada e, conseqüentemente, a obtenção do volume de combustível demandado, são utilizadas as informações constantes na Tabela 87, extraídas de relatórios divulgados pela Antaq nos estudos relacionados ao transporte hidroviário e à cabotagem do ano de 2012.

Tabela 87 – Características do Transporte Hidroviário e Cabotagem por Grupos de Mercadorias

Grupos de Mercadorias	Hidroviário		Cabotagem	
	Tonelada Transportada	Distância Média (km)	Tonelada Transportada	Distância Média (km)
Açúcar	23.543	574	0	0
Alumina	3.795.295	196	0	0
Bauxita	21.859.294	1013	0	0
Carvão mineral	550.500	196	0	0
Caulim	1.508.446	196	0	0
Celulose	0	0	1.083.542	1161
Combustíveis minerais e óleos minerais	6.836.646	916	107.048.724	841
Contêineres	4.367.623	1843	6.392.160	3585
Coque de petróleo	57.276	1	0	0
Enxofre, terras e pedras, gesso e cal	2.508.678	38	0	0
Farelo de soja	718.381	514	0	0
Fertilizantes e adubos	1.140.000	365	0	0
Gordura, óleos animais/vegetais	60.199	100	0	0
Madeira	0	0	1.944.853	1161
Malte e cevada	8.090	376	0	0
Manganês	12.545	578	0	0
Milho	3.598.422	795	0	0
Minério de ferro	9.684.573	421	1.440.224	5126
Preparações alimentícias diversas	0	0	0	0
Produtos hortícolas, plantas, raízes e tubérculos	768.867	62	0	0
Produtos químicos orgânicos	1.560.386	559	0	0
Sal	74.313	376	844.378	5126
Sementes e frutos oleaginosos diversos	54.739	576	0	0
Semirreboque baú	3.773.746	845	0	0
Soda cáustica	981.286	196	1.115.091	841
Soja	8.178.621	827	0	0
Trigo	56.156	30	0	0
Veículos terrestres – partes e acessórios	147.530	257	0	0
Outros – hidroviário	8.574.844	586	0	0
Outros – cabotagem	0	0	3.461.769	964
TOTAL	80.900.000	762	123.330.741	1074

Fonte: Elaborado a partir de BRASIL/ANTAQ, 2012b, 2013b, 2013d

5.4.2.1 EVOLUÇÃO DA CARGA TRANSPORTADA

Para a evolução da carga transportada, em tonelada, no sistema hidroviário e cabotagem, até 2050, utilizam-se as taxas de crescimento das mercadorias e *commodities* apresentadas na Tabela 134 – Anexo. Portanto, há a necessidade da equivalência da classificação dos 30 grupos de mercadorias apontada pela Antaq com a classificação de mercadorias do cenário econômico deste estudo. Caso determinada carga considerada pela Antaq não esteja apresentada dentre os grupos de mercadoria, é considerado o crescimento total da economia brasileira previsto até 2050 para representar a taxa de crescimento do transporte em toneladas.

Ademais, as projeções da carga transportada no modal hidroviário têm de estar aderentes aos planos governamentais de expansão do transporte hidroviário e da cabotagem. Ou seja, as demandas previstas por esses planos são limitadores dos valores encontrados em toneladas pela análise ao crescimento de cada grupo de mercadoria neste estudo.

Como limitador dessa tonelada transportada, é considerado o Plano Nacional de Logística Portuária (PNLP), elaborado pela Secretaria de Portos da Presidência da República, que aponta as demandas dos principais portos até 2030 e prevê as obras necessárias para a adequação da infraestrutura portuária, a fim de propiciar o aumento de movimentações de cargas.

Apesar de alguns portos não serem utilizados majoritariamente para cabotagem ou navegação interior, e sim para navegação de longo curso marítima (importação e exportação de mercadorias), os indicadores de crescimento do PNLП servem como base para os crescimentos deste estudo relativos ao transporte hidroviário e à cabotagem ficarem limitados, tendo em vista que o crescimento das movimentações de mercadorias teria de acompanhar as capacidades dos portos previstas pelo governo federal, em função de investimentos de 54,6 bilhões em obras portuárias até 2030.

No caso específico do transporte hidroviário, ainda há necessidade de se executarem obras para ampliação do número de quilômetros navegáveis, como dragagens e derrocamentos, particularidades que o PNLП não aborda e que, consequentemente, ficam de fora do escopo de análise neste estudo. A Tabela 88 apresenta os crescimentos previstos de demanda nos principais portos, para embarque e desembarque. No período de 2012 a 2030, a taxa de crescimento anual prevista de demanda nos principais portos é de 5,75% ao ano.

Tabela 88 – Taxas de Crescimento da Demanda para os Principais Portos Nacionais

Principais Portos	2012 – 2015 (%)	2015 – 2020 (%)	2020 – 2025 (%)	2025 – 2030 (%)
Santarém	169,38%	34,05%	23,61%	20,20%
Vila do Conde	18,85%	70,39%	27,29%	14,91%
Itaqui	42,85%	18,20%	15,92%	15,59%
Mucuri	-8,00%	17,74%	15,81%	14,55%
Pecém	225,13%	194,60%	3,19%	3,34%
Sua	219,32%	10,38%	12,91%	19,22%
Salvador	6,88%	19,78%	17,47%	15,99%
Aratu	33,58%	14,09%	15,03%	16,07%
Vitória	16,13%	28,20%	24,14%	19,91%
Rio de Janeiro	-4,52%	-6,32%	13,04%	11,17%
Itaguaí	18,90%	36,22%	36,40%	36,79%
Paranaguá	13,41%	25,09%	21,92%	21,54%
Itajaí	11,66%	22,61%	18,57%	16,15%
Rio Grande	16,70%	27,06%	25,12%	23,90%
Santos	20,33%	19,46%	20,26%	18,83%
Total	33,31%	36,03%	22,70%	22,94%
Total ao ano	10,06%	6,35%	4,18%	4,22%

Fonte: Elaborado a partir de BRASIL/SEP/PR, 2012

Assim, caso o crescimento anual oriundo dos resultados em toneladas encontrados estiver inferior às taxas de crescimento previstas pelo PNLP, os resultados são mantidos. No caso de o crescimento anual, ou a taxa média de crescimento acumulada desde 2012, ultrapassar a previsão do PNLP, o resultado do cálculo de toneladas transportadas é ajustado dentro do estabelecido pelo plano, pois se compreende que ilustra adequadamente as obras de infraestrutura e, sendo assim, não poderia haver um crescimento de demanda de cargas não suportado pela capacidade portuária. Destaca-se que essa lógica só foi realizada para o horizonte 2030. Para o período pós-2030, uma vez que o PNLP não disponibiliza a previsão de expansão da demanda dos principais portos, consideram-se as taxas de crescimento das mercadorias e *commodities* apresentadas na Tabela 134 – Anexo. Diante disso, a Tabela 89 apresenta o crescimento da carga transportada pelo modal no horizonte 2050.

Tabela 89 – Projeção do Transporte Hidroviário e Cabotagem por Grupos de Mercadorias

Grupos de Mercadorias	Toneladas Transportadas – Cabotagem e Transporte Hidroviário				
	2013	2020	2030	2040	2050
Açúcar	23.976	28.076	33.592	37.805	40.785
Alumina	3.827.818	4.275.913	5.534.089	6.887.616	8.065.236
Bauxita	22.046.610	24.627.448	31.874.007	39.669.753	46.452.344
Carvão mineral	552.816	610.395	825.085	1.072.226	1.278.158
Caulim	1.521.372	1.699.468	2.199.532	2.737.493	3.205.540
Celulose	1.105.335	1.277.411	1.470.367	1.604.641	1.707.825
Combustíveis minerais e óleos minerais	121.964.539	183.168.300	279.031.780	350.941.578	377.447.693
Contêineres	10.956.581	13.003.250	16.937.426	21.220.782	25.556.574
Coque de petróleo	58.510	70.077	90.028	108.776	123.348
Enxofre, terras e pedras, gesso e cal	2.554.562	3.031.750	3.949.015	4.947.694	5.958.597
Farelo de soja	732.152	860.989	1.040.663	1.191.340	1.312.915
Fertilizantes e adubos	1.129.914	1.180.112	1.406.821	1.642.721	1.832.458
Gordura, óleos animais/vegetais	61.272	72.293	90.061	106.583	120.410
Madeira	1.879.890	1.614.420	1.530.789	1.587.690	1.704.366
Malte e cevada	8.238	9.777	12.735	15.956	19.216
Manganês	13.326	18.214	21.350	22.017	22.857
Milho	3.681.054	4.430.186	5.472.422	6.339.593	7.060.198
Minério de ferro	11.816.982	16.151.969	18.932.665	19.524.323	20.269.282
Preparações alimentícias diversas	0	0	0	0	0
Produtos hortícolas, plantas, raízes e tubérculos	782.930	929.179	1.210.306	1.516.384	1.826.208
Produtos químicos orgânicos	1.580.969	1.816.024	2.376.833	2.973.101	3.482.665
Sal	935.494	1.110.243	1.446.150	1.811.872	2.182.070
Sementes e frutos oleaginosos diversos	55.797	65.921	80.747	93.645	104.247
Semirreboque baú	3.842.769	4.560.590	5.940.412	7.442.701	8.963.380
Soda cáustica	2.124.483	2.446.283	3.218.046	4.042.077	4.746.583
Soja	8.382.477	10.133.125	12.404.731	14.153.887	15.538.894
Trigo	57.424	69.300	87.283	102.737	115.210
Veículos terrestres – partes e acessórios	150.662	189.286	282.240	407.024	559.531
Outros – hidroviário	8.731.679	10.362.740	13.498.021	16.911.576	20.366.919
Outros – cabotagem	3.525.085	4.183.564	5.449.315	6.827.409	8.222.373
TOTAL	214.104.717	291.996.304	416.446.511	515.940.999	568.285.881

Fonte: Elaborado a partir de BRASIL/ANTAQ, 2012b, 2013b, 2013d

5.4.2.2 EVOLUÇÃO DA INTENSIDADE DE USO

No cenário REF, a quilometragem média percorrida por grupo de mercadoria é considerada constante ao longo da projeção. A premissa é que, a despeito da possibilidade de obras em hidrovias aumentarem a quantidade de quilômetros navegáveis, tal fato não se traduzirá em aumento da média da distância percorrida porque, além de a carga que já utiliza o transporte hidroviário e cabotagem buscar a otimização pela menor distância até o destino final da mercadoria, a mudança de um outro modal para o hidroviário ou cabotagem pode até reduzir a distância média por tipo de *commodity* transportada. Ou seja, opta-se pela manutenção da quilometragem média percorrida de 2012, apresentada na Tabela 87, em virtude de a modelagem não conjugar todos os modais, em uma análise concorrencial.

5.4.2.3 EVOLUÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO

Apesar de o transporte hidroviário e a cabotagem apresentarem consumo menor em litros por TKU do que os outros modais, de acordo a Confederação Nacional de Transportes (CNT), que coloca o transporte por hidrovias interiores com um consumo médio de 4,1 litros/1.000TKU enquanto a cabotagem tem desempenho ligeiramente superior, com 4,0 litros/1.000TKU, neste estudo, opta-se por seguir a evolução histórica do setor (CNT, 2013d, 2013a).

Antes da elaboração, pela Antaq, de relatórios do fluxo de movimentações de carga em hidrovias e cabotagem em toneladas e TKU, a empresa do governo federal responsável por divulgar a tonelada transportada no transporte aquaviário era a Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (Geipot), o que ocorreu até 2001, referente ao ano 2000. Após a extinção da Geipot pela Lei nº 10.233, de 5 de junho de 2001, a Antaq iniciou a entrega anual dos anuários do transporte aquaviário (BRASIL/ANTAQ, 2014b)”.

Em 2011, a Antaq elaborou o primeiro relatório do transporte hidroviário para contabilizar o respectivo número de TKU. Em 2013, a agência reguladora fez o mesmo para a cabotagem, apresentando a tonelada-quilômetro transportada para os anos de 2011 e 2012. Os dados apurados constam na Tabela 90. Conforme discutido no capítulo 1 deste estudo, no caso da cabotagem, para evitar dupla contagem, é contabilizada a cabotagem em vias interiores como transporte hidroviário.

Tabela 90 – Tonelada-Quilômetro Útil do Transporte Hidroviário e Cabotagem Somente Marítima

Ano	Hidroviário 10 ⁶ TKU	Cabotagem 10 ⁶ TKU
2010	57.880	–
2011	60.890	128.852
2012	61.633	132.396

Fonte: BRASIL/ANTAQ, 2012a, 2012b, 2013a, 2013b, 2013d

Sendo assim, para estabelecimento de uma série de TKU em transporte de cargas hidroviário e cabotagem, considera-se a análise da EPE até 2010, que agrega os dois subtipos de transporte aquaviário em único número de TKU (BRASIL/EPE, 2012a). A partir de 2010, como a Antaq disponibiliza o TKU em separado do transporte hidroviário e da cabotagem, a premissa é da replicação da proporção encontrada de 2010 a 2012 para os anos anteriores (1996-2009). Isto é, 31% da quantidade de tonelada-quilômetro útil seriam oriundos do transporte hidroviário, enquanto o restante, 69%, do transporte de cabotagem (BRASIL/ANTAQ, 2013b, 2013d). A Figura 105 apresenta a distribuição de TKU no período de 1996-2012.

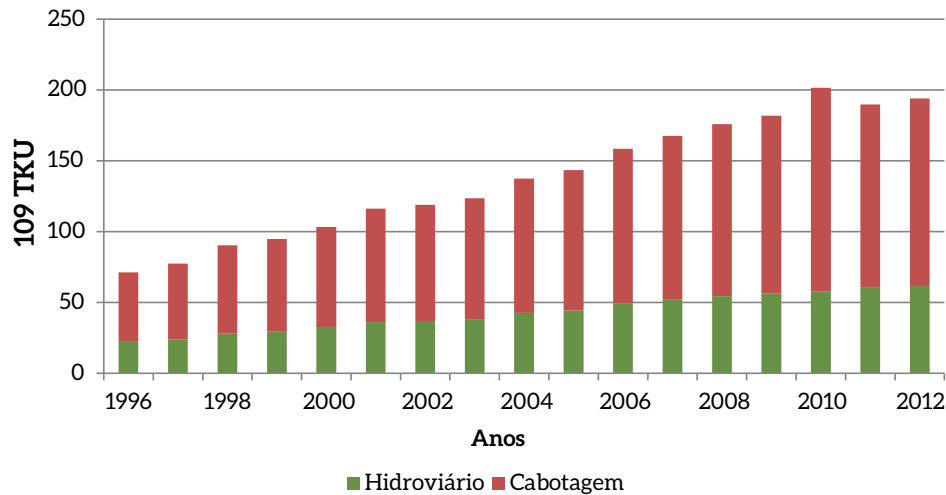


Figura 105 – Bilhões de Tonelada-Quilômetro Útil no Transporte Aquaviário

Fonte: Elaborado a partir de BRASIL/ANTAQ, 2012b, 2012a, 2013a, 2013c, 2013b; BRASIL/EPE, 2012a

A partir dessa divisão entre hidrovias e transporte somente marítimo, podem-se alcançar os consumos médios anuais por tipo de combustível por TKU, respectivamente, de óleo diesel e óleo combustível, demonstrados na Figura 106, que já exclui o volume de óleo diesel marítimo destinado ao transporte de passageiros.

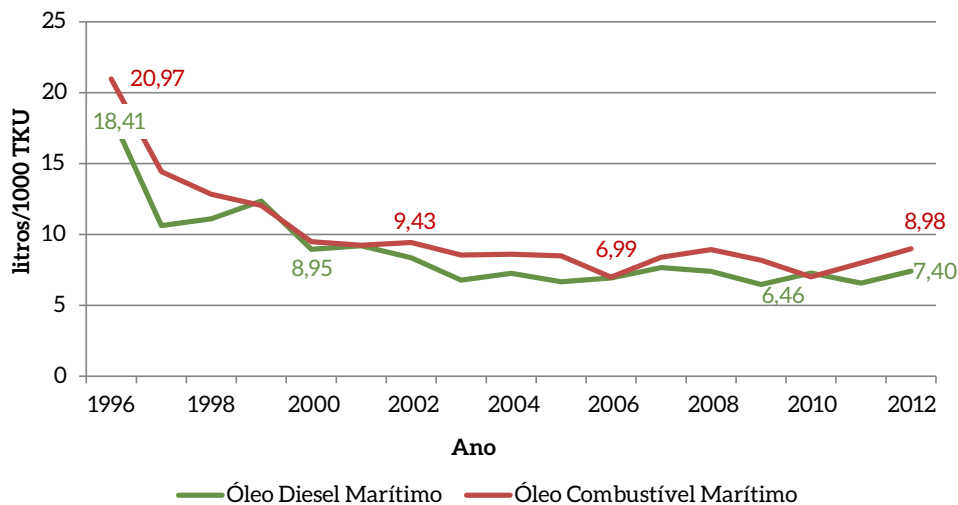


Figura 106 – Consumo Específico de Óleo Diesel e Combustível no Transporte Aquaviário de Cargas

Fonte: Elaborado a partir de BRASIL/ANTAQ, 2012b, 2012a, 2013a, 2013c, 2013b; BRASIL/EPE, 2012a

Observando a Figura 106, é possível chegar ao entendimento de que, a partir do ano 2000, os consumos específicos tanto do óleo diesel quanto do óleo combustível têm mantido variações de 6,46 litros/1.000TKU até 8,95 litros/1.000TKU e de 6,99 litros/1.000TKU até 9,43 litros/1.000TKU, respectivamente. No período de 2000-2012, a média de consumo de óleo diesel no transporte hidroviário foi de 7,45 litros/1.000TKU, com um desvio-padrão relativo (razão entre o desvio-padrão e a média) de 11,83%. Já o transporte de cabotagem obteve um desvio-padrão relativo menor (9,44%), tendo um consumo médio de óleo combustível de 8,48 litros/1.000TKU.

Os valores médios de consumo de combustível encontrados entre 2000 e 2012 são os utilizados na projeção do cenário REF. Os consumos específicos entre 1996 e 1999 não são considerados na análise deste trabalho por divergirem muito dos consumos dos últimos anos.

Dessa maneira, a consideração feita na projeção é que os ganhos de eficiência obtidos até o ano 2000 estabilizaram o consumo de combustível em litros/TKU dentro de uma faixa, e a média do período pós-2000 reflete, de forma aproximada, o consumo específico considerado durante a análise até 2050. Diferentemente de outros modais, não se observam ganhos de eficiência energética ao longo dos anos no Brasil, no cenário REF do modal hidroviário, mantendo-se o consumo específico de óleo diesel de 7,45 litros/mil TKU e o consumo específico de óleo combustível de 8,48 litros/mil TKU, pois uma redução dependeria de promoção de ações de eficiência energética nas embarcações existentes, bem como da incorporação de tecnologias e medidas nas novas embarcações.

5.5 PROJEÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE GEE

Nesta seção do trabalho, são apresentados os resultados do cenário REF para consumo energético e emissões de GEE no setor de transportes no Brasil, para o período de 2013 a 2050. Destaca-se que o cenário desenvolvido considera a manutenção, ou pouca variação, da atual conjuntura do setor do país. Ou seja, o cenário leva em conta a atual estrutura e a maneira como se deu a evolução do setor até o momento, fazendo crer que, no futuro, a situação do setor será, em linhas gerais, a extrapolação do histórico, contabilizando-se políticas energéticas atualmente em curso.

De acordo com as projeções realizadas, apresentadas na Tabela 91 e na Figura 107, o óleo diesel permanece como o combustível mais consumido pelo setor de transportes no Brasil. Contudo, a representatividade do diesel no setor cai de 48%, em 2013, para 43%, em 2050. Tal fato decorre, fundamentalmente, do aumento da frota de veículos leves no país, que impulsiona a demanda, em especial, de álcool etílico, que passa a representar 17% do consumo do setor no país, em 2050. Cumpre enfatizar o surgimento da demanda de biojet no setor com a mistura obrigatória prevista no cenário, a partir de 2045, alcançando o patamar de 5% no ano de 2050, no modal aéreo. Destaca-se também o aumento do consumo de eletricidade no setor em função do aumento previsto do transporte ferroviário de passageiros e da entrada dos veículos leves elétricos a partir de 2040.

Tabela 91 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Combustível (mil tep)

	2013	2020	2030	2040	2050
Óleo diesel	41.246	47.147	53.259	60.681	67.781
Biodiesel	3.074	5.185	5.847	6.659	7.438
Álcool etílico anidro	5.237	6.734	8.807	9.650	9.343
Álcool etílico hidratado	6.803	13.108	18.740	20.237	17.963
Gasolina automotiva	19.909	25.601	33.481	36.685	35.518
Gás natural veicular	1.340	1.671	1.504	948	372
Querosene de aviação	5.949	8.965	13.066	15.437	15.956
Biojet	0	0	0	0	22
Óleo combustível	1.139	1.621	2.383	2.911	3.096
Eletricidade	162	181	344	516	697
Total	84.861	110.213	137.431	153.723	158.184

Fonte: Elaboração própria

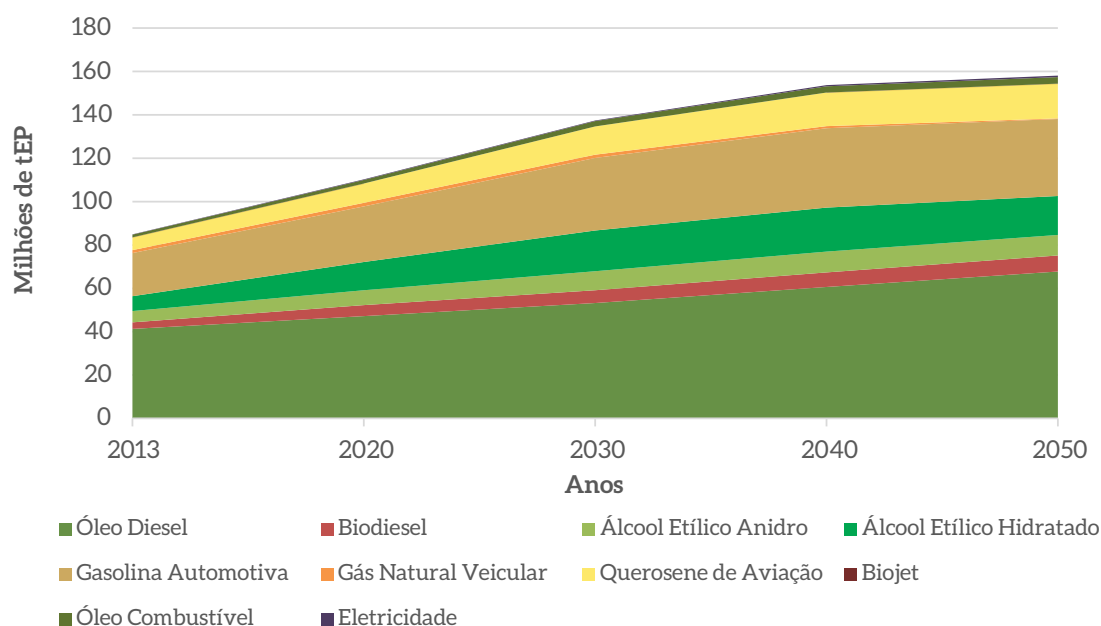


Figura 107 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Combustível

Fonte: Elaboração própria

Do ponto de vista dos modos de transporte, o modal rodoviário permanece como o segmento mais representativo do setor de transportes, como exibido na Tabela 92 e na Figura 108. Cabe enfatizar que o comportamento de longo prazo do setor sofre influência das variáveis socioeconômicas consideradas nesse período. Destaca-se, ainda, que, para o ano de 2013, os valores obtido na simulação do tipo *bottom-up*, considerada para fins de desagregação com vistas à construção de cenários de baixo carbono, estão em conformidade com os valores fornecidos pelo Balanço Energético Nacional, de 83,2 MtEP na totalidade do setor (BRASIL/EPE, 2014a).

Tabela 92 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Modal (mil tep)

Modal	2013	2020	2030	2040	2050
Rodoviário	75.835	97.459	119.027	131.437	134.014
Ferroviário	1.418	1.556	2.181	3.039	4.112
Hidroviário	1.658	2.233	3.157	3.811	4.080
Aéreo	5.949	8.965	13.066	15.437	15.978
Total	84.861	110.213	137.431	153.723	158.184

Fonte: Elaboração própria

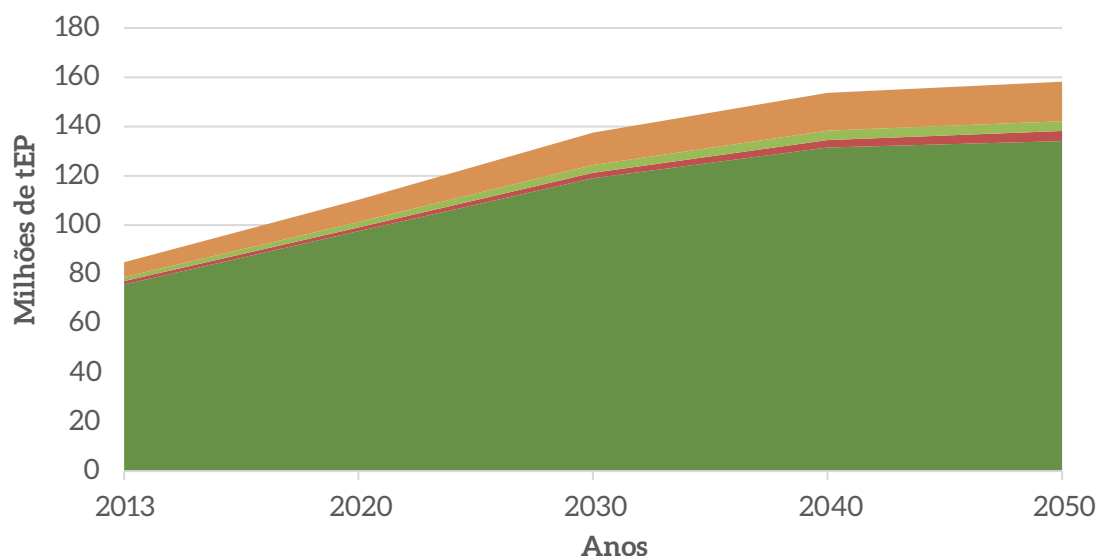


Figura 108 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Modal

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 93 exibe as emissões totais de CO₂, CH₄ e N₂O para o setor no horizonte 2050. Verifica-se que, nesse cenário, o modal rodoviário permanece como principal emissor do transporte, respondendo por mais de 81% da emissão total em 2050. Para o ano de 2010 e comparativamente às emissões de GEE constantes da Terceira Comunicação Nacional, o incremento nas emissões totais seria de 123% em 2050.

Tabela 93 – Emissão de Gases de Efeito Estufa por Modal (GgCO₂eq)

Modal	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Rodoviário	195.244	221.488	241.816	262.144	276.850	291.555	299.034	306.513
Ferrovário	3.666	3.819	4.460	5.102	6.054	7.005	8.245	9.484
Hidroviário	5.778	7.086	8.559	10.031	11.072	12.113	12.538	12.964
Aéreo	20.185	26.570	32.647	38.723	42.237	45.750	46.520	47.289
Total	224.874	258.963	287.482	316.000	336.212	356.424	366.337	376.250

Fonte: Elaboração própria

Cumprir destacar que essas estimativas englobam apenas as emissões relacionadas com o uso final do setor, e as emissões de CO₂ oriundas da biomassa são desconsideradas. Ou seja, as emissões atreladas ao desmatamento no cultivo da biomassa não são consideradas neste estudo, mas fazem parte do estudo no âmbito do subprojeto de agricultura, florestas e outros usos do solo (Afolu). Para as emissões de CH₄ e N₂O oriundas da combustão de biomassas, contudo, devem ser contabilizadas, pois tais gases não foram fixados da atmosfera quando do crescimento da biomassa, ao contrário do CO₂.

Nas próximas seções, são detalhados os resultados, em termos de atividades do setor medidas em passageiro-quilômetro ou tonelada-quilômetro, para o transporte de passageiros e para o transporte de carga, no horizonte 2050.

5.5.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

Para o transporte de passageiros, o aumento populacional e da renda *per capita* influencia o crescimento da frota de veículos leves do país. Entretanto, o uso acentuado do transporte privado previsto no cenário repercute negativamente na qualidade de vida da população em decorrência do aumento dos congestionamentos e da redução do desempenho energético dos veículos.

Cria-se, assim, uma possível questão de contraproduzitividade do uso de veículos leves nas grandes cidades brasileiras, visto que apenas a eficiência da frota, normalmente o foco das políticas adotadas nos países em desenvolvimento, não é suficiente para reduzir o consumo energético do setor, pois esta acaba sendo anulada pelo aumento dos congestionamentos nas cidades.

Dessa forma, apesar do aumento previsto da malha ferroviária de transporte de passageiros, que triplica o efeito atividade ao longo do horizonte analisado, o modal rodoviário permanece como principal representante da atividade do setor, conforme apresentado na Tabela 94. Dentro do modal rodoviário, contudo, a participação do transporte individual permanece como mais significativa no período estudado.

Tabela 94 – Passageiros-Quilômetro Transportados por Modal (Milhões de PKM)

Modal	2013	2020	2030	2040	2050	Variação Média Anual
Rodoviário	1.681.670	2.308.969	3.055.335	3.567.484	3.927.143	2,32%
Ferrovário	28.000	30.000	50.000	75.000	90.000	3,21%
Hidroviário	1.919	2.090	2.277	2.328	2.310	0,50%
Aéreo	210.861	340.325	562.092	778.367	1.023.317	4,36%

Fonte: Elaboração própria

Em termos percentuais, o modal rodoviário representará 78% da matriz de transporte de passageiros, como observado na Figura 109. O transporte individual rodoviário, por sua vez, permanece, em 2050, com a participação verificada atualmente, de aproximadamente 54%.

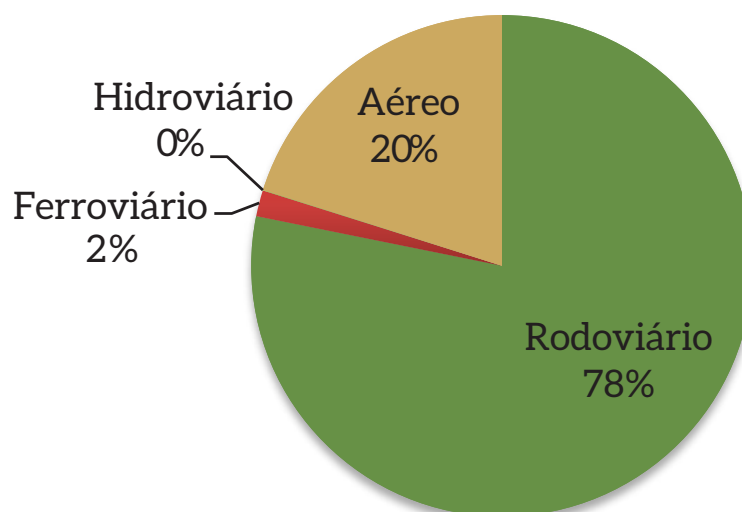


Figura 109 – Distribuição Modal do Transporte de Passageiros – 2050

Fonte: Elaboração própria

5.5.2 TRANSPORTE DE CARGA

No transporte de cargas, as perspectivas macroeconômicas repercutem no aumento do fluxo das *commodities* e no consequente desenvolvimento do transporte de carga no país. Em conformidade com as premissas apresentadas em Brasil/EPE (2014b), o cenário REF deste estudo prevê a concretização dos investimentos previstos em infraestrutura no setor.

Assim, assume-se que os programas voltados para o setor de logística, em especial o PAC e o PIL, acarretarão maior participação dos modais menos energointensivos, como os modais ferroviário e hidroviário. A Tabela 95 apresenta o crescimento previsto da atividade do setor, medida em TKU, para os diferentes modais, no período entre 2013 e 2050.

Tabela 95 – Toneladas-Quilômetro Transportadas por Modal (Milhões de TKU)

Modal	2013	2020	2030	2040	2050	Variação Média Anual
Rodoviário	815.832	995.833	1.159.706	1.393.602	1.635.179	1,90%
Ferroviário	316.462	432.405	623.303	944.210	1.423.934	4,15%
Hidroviário	203.255	275.515	393.073	477.424	513.568	2,54%
Aéreo	8.635	9.203	8.317	9.573	11.986	0,89%

Fonte: Elaboração própria

Em termos absolutos, a projeção do cenário de transporte de carga deste estudo encontra-se abaixo das estimativas de Brasil/EPE (2014b) devido, principalmente, às premissas macroeconômicas adotadas, que preveem menor crescimento das mercadorias transportadas, em comparação com o estudo. Contudo, do ponto de vista percentual, a matriz de transporte de carga do setor está em consonância com as expectativas previstas em Brasil/EPE (2014b), conforme apresentado na Figura 110.

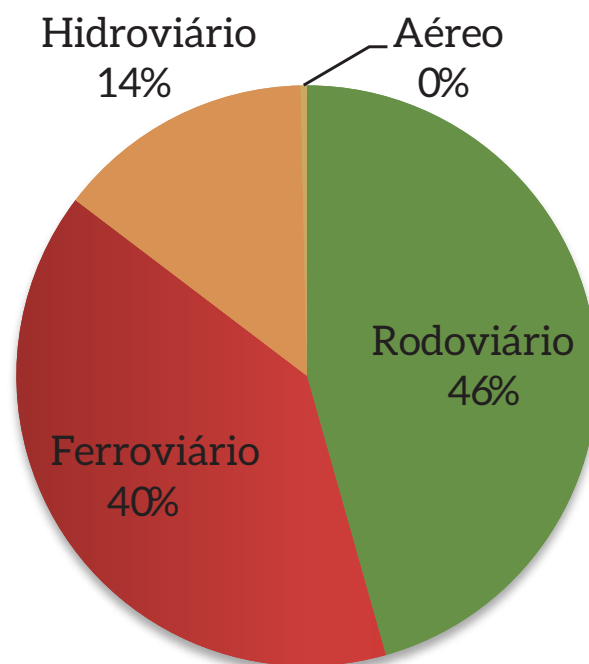
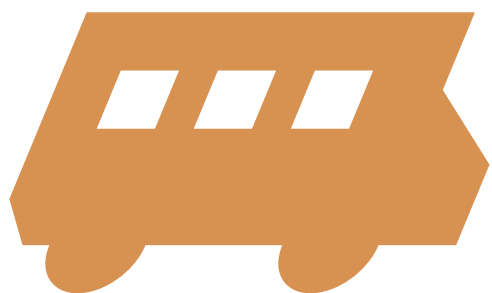


Figura 110 – Distribuição Modal do Transporte de Carga – 2050

Fonte: Elaboração própria



Cenário de baixo carbono

Capítulo

6

6 CENÁRIO DE BAIXO CARBONO

Neste capítulo, elabora-se o cenário BC do setor de transportes, no horizonte 2050, com foco no consumo de energia e nas emissões de GEE. Também serão apresentados os custos marginais de abastecimento das medidas consideradas nesse cenário. Tendo em vista a melhor avaliação das premissas e hipóteses de trabalho adotadas neste estudo, assim como o adotado no cenário REF, tanto premissas quanto hipóteses serão apresentadas separadamente por modal.

Esse cenário busca incorporar programas, políticas públicas, ações e estratégias que podem ser desenvolvidas no setor de transportes com o objetivo de reduzir as emissões de GEE pelo setor, focado em três pontos principais:

- i) Maior uso de biocombustíveis;
- ii) Valorização de modais menos intensivos em energia e/ou carbono;
- iii) Eficientização da frota de veículos.

No cenário macroeconômico adotado nesse cenário, não são previstas mudanças nas taxas anuais de crescimento do PIB nacional e da taxa de crescimento anual das *commodities* e dos produtos transportados no país, seguindo os valores apresentados no cenário REF discutidos no capítulo 5.

No tocante aos biocombustíveis, o cenário BC prevê a manutenção da mistura obrigatória de 7% de biodiesel ao óleo diesel, passando a B8 entre 2017 e 2019; B10 entre 2020 e 2030; B20 entre 2031 e 2050. No âmbito do transporte hidroviário, cabe destacar que a ANP não permite mistura de biodiesel superior a 0,1% com os combustíveis marítimos devido à segurança e às condições técnico-operacionais limitantes, de acordo com a orientação da norma técnica internacional ISO 8217 (*Fuel Standard for Marine Distillate Fuels*). Devido a esse aspecto, não haverá a inserção de biodiesel no diesel e óleo combustível marítimo no cenário BC. Quanto ao etanol, o cenário considera a manutenção da mistura de 27,5% de álcool anidro na composição da gasolina C, no horizonte 2050, de forma semelhante ao cenário REF. Destaca-se que, apesar da premissa de manutenção da mistura de álcool anidro na gasolina C, o cenário BC prevê maior participação do etanol a partir do maior uso nos veículos flexíveis, como detalhado na seção 6.1.1. Com relação ao uso de biocombustíveis na aviação (biojet), a premissa adotada para o cenário BC é de que sua utilização será mandatória a partir do ano 2040, alcançando o patamar de 10% no ano de 2050. O Quadro 6 exhibe as premissas gerais do cenário BC em comparação com o cenário REF.

Quadro 6 – Premissas Gerais do Cenário de Baixo Carbono

Premissas	Referência	Baixo Carbono
Biodiesel	B7 até 2016 B8 entre 2017 e 2019 B10 entre 2020 e 2050	B7 até 2016 B8 entre 2017 e 2019 B10 entre 2020 e 2030 B20 até 2050
Etanol	Mistura de 27,5% de anidro na gasolina C Uso de hidratado nos veículos flexíveis em 36% do tempo, em 2050	Mistura de 27,5% de anidro na gasolina C Uso de hidratado nos veículos flexíveis em 60% do tempo, em 2050
Biojet	Entrada gradual a partir de 2045 atingindo 5% em 2050	Entrada gradual a partir de 2040 atingindo 10% em 2050

Fonte: Elaboração própria

Nas subseções 6.1 a 6.4, são apresentadas as premissas e estimativas relacionadas aos diferentes modais, com o intuito de fornecer as bases de projeção para o consumo de energia e emissões de GEE do setor de transportes no horizonte 2050, a ser apresentado na subseção 6.5. Na subseção 6.6, são discutidos os resultados sob o ponto de vista dos custos marginais de abatimento das atividades de baixo carbono consideradas nesse cenário.

6.1 MODAL RODOVIÁRIO

Conforme discutido, este estudo utiliza, para a modelagem do modal rodoviário, um modelo paramétrico de consumo de energia e atividade veicular baseado em quatro variáveis-chave, conforme discutido no cenário REF:

- Frota de veículos baseada nas vendas de veículos novos e na probabilidade de sucateamento da frota circulante;
- Intensidade de uso (ou quilometragem percorrida anualmente);
- Consumo específico (ou autonomia veicular);
- Fator de ocupação.

A seguir, são apresentadas as premissas para estimar a evolução dessas variáveis no cenário BC.

6.1.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

No que diz respeito ao modal rodoviário de passageiro, a construção do cenário BC prevê: i) melhorias nas eficiências dos modais; ii) penetração de novas tecnologias veiculares; iii) maior uso do transporte coletivo, realizado por ônibus em detrimento dos automóveis, principalmente nas grandes metrópoles. Tal cenário enseja retenção dos níveis de congestionamento nas cidades, impactando o desempenho energético dos modais e o consequente consumo de combustível do setor.

6.1.1.1 EVOLUÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS

A projeção da frota de veículos leves no período de simulação é baseada na metodologia do capítulo 4, acrescida da penetração de novas tecnologias, como: automóveis híbridos *plug-in flex fuel*⁴² e automóveis a bateria. A introdução dessas novas tecnologias se inicia em 2030, chegando a 15% das vendas para *plug-in flex* e 20% das vendas para veículos a bateria em 2050. Os automóveis híbridos representam 57% das vendas, enquanto os automóveis *flex fuel* 5% e a gasolina apenas 3% em 2050.

Quanto à curva de sucateamento por categoria de veículos, os parâmetros utilizados também seguem a mesma metodologia do capítulo 5. Para fins de simulação do cenário BC, estima-se que o perfil de sucateamento não sofrerá alteração ao longo do horizonte de análise, mantendo-se de forma semelhante ao cenário REF, conforme exibido na Figura 93.

Dessa forma, a composição da frota de veículos automotores para transporte de passageiros no país apresenta o mesmo perfil do capítulo 5, com destaque apenas para a penetração das novas tecnologias na categoria automóveis, conforme exibido na Figura 111.

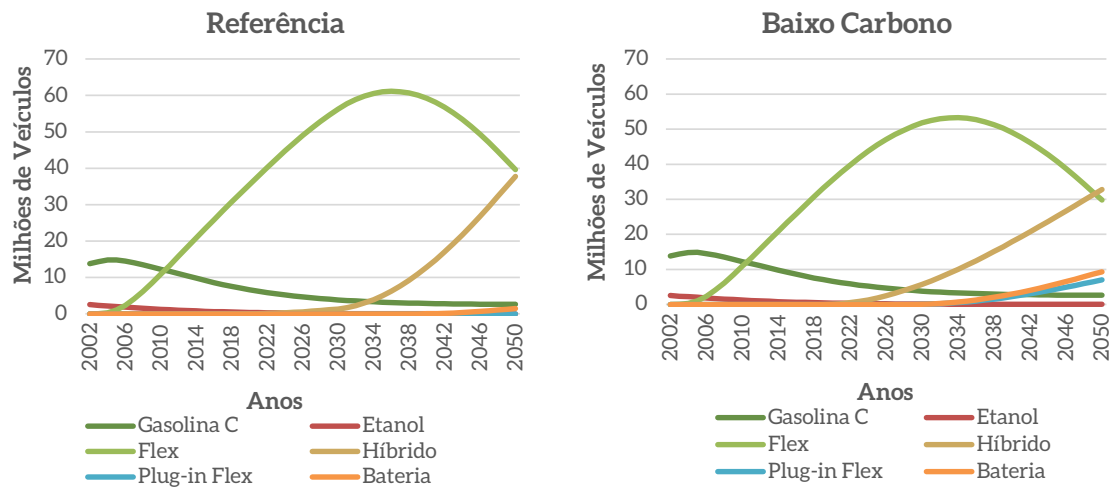


Figura 111 – Evolução da Frota Circulante dos Automóveis (Milhões de Veículos) – Cenários de Referência e Baixo Carbono

Fonte: Elaboração própria

Observa-se, portanto, que a frota de automóveis *flex fuel* alcança um pico de cerca de 56 milhões em 2035 e é superada pela frota de veículos híbridos em 2050, a qual ultrapassa 34 milhões. Ressalta-se também o crescimento da frota de veículos *plug-in flex*, que alcança o montante de 7,4 milhões em 2050, bem como os veículos elétricos a bateria (VEB), com cerca de 10 milhões.

⁴² Os veículos híbridos *plug-in flex fuel* são aqueles equipados de dois motores para acionamento do veículo: um a combustão interna e outro elétrico. O motor a combustão permite o uso de gasolina C (comum) ou álcool hidratado como combustível, e a bateria do veículo pode ser recarregada com alimentação proveniente da rede elétrica, além do motor a combustão e da frenagem regenerativa.

Na determinação do tipo de combustível de cada veículo vendido, um destaque deve ser dado aos veículos leves do ciclo Otto. Conforme disposto no Quadro 5, tais motores podem operar movidos a gasolina, etanol, uma mistura de ambos (*flex fuel*) ou ainda GNV. Cabe ao consumidor decidir, no momento de abastecer seu veículo, qual combustível utilizar. O mesmo vale para os veículos híbridos e *plug-in flex*, com destaque para o último, em que o consumidor pode optar pela energia elétrica como combustível.

No caso dos veículos *flex*, o percentual da frota de veículos bicomcombustíveis que utilizam etanol é assumido crescente até, em 2050, atingir a participação de 60% da frota. Quanto à frota de GNV, são adotados os valores informados pelo IBP (2014), o que indica uma frota de aproximadamente 1,8 milhão de veículos convertidos ao GNV em 2014, frota mantida constante até 2050.

6.1.1.2 EVOLUÇÃO DA INTENSIDADE DE USO

No cenário BC, de forma análoga ao cenário REF, considera-se o comportamento da quilometragem média percorrida pelos veículos de passageiros, de acordo com a idade do veículo, mantida constante em relação ao ano-base da simulação até o ano de 2020. Para o período pós-2020, assume-se, além da redução da quilometragem percorrida pelos veículos em função da expectativa de envelhecimento da população do país (BRASIL/IBGE, 2013), em conformidade com o cenário REF, a redução do uso dos veículos, tendo em vista a hipótese de mudança para o modal ônibus urbano. Sendo assim, dado que um automóvel percorre, em média, 15 mil km por ano e que, desse total, 70% são para os dias úteis e 30% para o final de semana, considerou-se que, em 2050, os usuários de automóveis passarão a andar, na média, dois dias úteis a menos de carro, utilizando o ônibus urbano para realizar seus deslocamentos. Isso representa, em média, 6.300 km percorridos por automóveis em dias úteis e 4.500 km nos finais de semana, totalizando 10.800 km por ano. Desse modo, a quilometragem média percorrida pelos automóveis foi reduzida em até 28% em 2050, com relação ao cenário REF, e transferida para a categoria ônibus urbano.

6.1.1.3 EVOLUÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO

Um dos principais fatores variáveis que afetam a eficiência veicular é o progresso tecnológico/adoção de tecnologias eficientes. Nesse sentido, no cenário BC, foi considerada a adoção de tecnologias mais eficientes para todos os modais rodoviários.

Dentre os aspectos incrementais para eficiência dos automóveis e comerciais leves, as possibilidades incluem fatores termodinâmicos, melhorias na aerodinâmica e redução do arrasto, adequação do número e funcionalidade das válvulas, injeção direta de combustível, redução do atrito no sistema de transmissão e tração, redução do tamanho e do atrito do motor, gerenciamento do aquecimento do motor e sistemas *start-stop*. Em especial, o sistema *start-stop* – cujo funcionamento se dá com o desligamento do motor de forma automática quando o veículo está parado e sua reiniciação instantânea quando o acelerador é acionado – reduz as perdas da marcha lenta (ATABANI et al., 2011), particularmente útil em engarrafamentos.

Incluem-se como tecnologias incrementais para os ônibus: melhorias aerodinâmicas, como redução de altura do veículo e redução da carga de vento nos pneus; substituição por materiais mais leves, de modo a reduzir a massa do veículo; utilização de pneus de base larga e melhorias na resistência de rolamento dos pneus; melhorias no motor, dado um sistema variável de controle de válvulas, melhorias nos ciclos de combustão e redução de atrito nas partes móveis; utilização de sistemas automáticos de partida e parada e centrais de apoio, a partir de sistemas adaptativos e preditivos (CANADA/NRC, 2011).

Desse modo, foi possível melhorar a eficiência dos automóveis, dos comerciais leves e dos ônibus em até 30% em 2050 (CANADA/NRC, 2011). As motocicletas apresentaram melhorias na faixa de 15%. Os parâmetros técnico-econômicos dessas tecnologias serão mais bem descritos na seção 6.1.1.5.

6.1.1.4 EVOLUÇÃO DO FATOR DE OCUPAÇÃO

Neste estudo, o fator de ocupação dos veículos de passageiros, no cenário BC, foi considerado análogo ao cenário REF, discutido no item 5.1.1.4.

6.1.1.5 CUSTOS E POTENCIAL DE ECONOMIA

Com a implementação de novas tecnologias para a frota rodoviária, cujas descrições estão disponíveis no capítulo 3, são incorridos custos associados a essas medidas, conforme estabelecido pelo relatório Canada/NRC (2011). Na Tabela 96, pode-se observar o potencial de economia de energia das tecnologias, bem como os custos incrementais incorridos pelos veículos leves, automóveis e comerciais leves. O potencial total do pacote de ações considerado, que inclui todas as medidas detalhadas na Tabela 96, foi estimado a partir da combinação dos ganhos individuais das tecnologias, conforme será detalhado na seção 6.1.2.3 (Equação 23). Quanto aos custos totais do pacote de ações, foi considerada uma média de acordo com os custos das tecnologias de baixo carbono.

Tabela 96 – Automóveis e Comerciais Leves: Potenciais de Economia de Energia e Custos Incorridos

Macroações	Tecnologias	Faixa de Ganho (%)	Faixa de Custo de Capital (US\$)
Aerodinâmica	Melhoria na aerodinâmica e redução do arrasto	1 a 5	50 – 200
Pneus e rodas	Redução da resistência de rolamento dos pneus	1 a 5	10 – 80
Transmissão e sistema de tração	Redução do atrito no sistema de transmissão e tração, transmissão continuamente variável e continuamente variável avançada, automática, dupla embreagem, aumento do número de relação de velocidade entre motor e roda	1 a 10	30 – 1.000
Motor	Redução do atrito no motor, redução acentuada no tamanho e peso do motor associado a turboalimentação, utilização de lubrificantes com baixo atrito, controle térmico, melhoria nos ciclos da termodinâmica, adequação do número e funcionalidade das válvulas, desativação dos cilindros, injeção direta de gasolina, conversão para diesel e diesel avançado, melhoria no combustível, sistema <i>start-stop</i> e melhoria nos acessórios do motor	1 a 40	1.700 – 6.000
Pacote de ações		~ 30%	~ US\$ 6.000

Fonte: Elaboração própria a partir de CANADA/NRC, 2011

Quanto ao potencial de economia de energia das tecnologias implementadas no modal ônibus, bem como seus custos incrementais incorridos, pode-se visualizar na Tabela 97.

Tabela 97 – Ônibus: Potenciais de Economia de Energia e Custos Incorridos

Macroações	Tecnologias	Faixa de Ganho (%)	Faixa de Custo de Capital (US\$)
Aerodinâmica	Entrada de ar frontal, carenagem na parte superior da cabine, redução de altura do veículo, redução de carga de vento nos pneus	1 a 5	–
Redução da massa	Substituição por materiais mais leves	1 a 5	2.000 – 5.000
Pneus e rodas	Pneu de base larga, redução da resistência de rolamento dos pneus	1 a 5	–
Motor	Turbocompressor, <i>turbocompounding</i> , <i>turbocompounding</i> elétrico, sistema variável de controle de válvulas, eletrificação de cargas auxiliares, melhorias nos ciclos de combustão, redução de atrito nas partes móveis	1 a 15	3.000 – 8.000
Redução do tempo ocioso	Sistemas automáticos de partida e parada, baterias auxiliares, sistema auxiliar de energia elétrica e centrais de apoio	2 a 10	3.000 – 8.000
Sistemas inteligentes	Sistema adaptativo, sistema preditivo	1 a 10	800 – 3.000
Pacote de ações		~ 30%	~ US\$ 22.000

Fonte: Elaboração própria a partir de CANADA/NRC, 2011

Para as motocicletas, foram considerados ganhos de eficiência e custos incorridos no valor de 50% do pacote de ações dos veículos leves de modo a alcançar economia de energia de até 15% em 2050 a partir de um custo de cerca de US\$ 3.000. Ressalta-se que, no cenário BC, não foram consideradas melhorias em infraestrutura e logística rodoviária.

Os custos dos veículos foram estimados fundamentalmente conforme dados da Tabela Fipe, a qual expressa os preços médios dos veículos no mercado nacional, que podem ser visualizados na Tabela 98.

Tabela 98 – Custos Médios dos Veículos Rodoviários de Transporte de Passageiros

Categoria do Veículo	Motor	Custos (US\$)
Motocicletas	Otto/Gasolina	7.000
	Otto/Flex Fuel	7.000
Automóveis	Otto/Gasolina	18.000
	Otto/Etanol	13.000
	Otto/Flex Fuel	18.000
	Otto/GNV	20.000
	Híbrido/Flex Fuel	55.000
	Plug-in/Flex Fuel e Eletricidade	75.000
	Bateria/Eletricidade	95.000
Comerciais leves	Otto/Gasolina	18.000
	Otto/Etanol	18.000
	Otto/Flex Fuel	18.000
	Diesel	18.000
Micro-ônibus	Diesel	80.000
Ônibus urbanos	Diesel	70.000
Ônibus rodoviários	Diesel	90.000

Fonte: Elaboração própria a partir de FIPE, 2015

6.1.2 TRANSPORTE DE CARGA

A primeira diferença estabelecida entre o cenário REF e o cenário BC, e talvez a mais impactante, é a de que parte da atividade do setor rodoviário de cargas migraria para os setores ferroviário e hidroviário. Sabe-se que, para que a migração ocorra, são necessários investimentos de longa maturação no setor de transporte de cargas, como é o caso do PAC, lançado em 2007 e com segunda etapa em 2010 (BRASIL/SPNT, 2012), que busca retomar os investimento em infraestrutura de transportes no Brasil.

Portanto, como premissas para esta análise, considera-se que os efeitos de uma mudança de modal só seriam sentidos a partir do ano de 2020. Tais efeitos são estabelecidos como uma parcela da quantidade de TKU do setor rodoviário de cargas que migraria para os demais setores.

A concorrência entre os modais ferroviário e hidroviário com o modal rodoviário se dá na classe de caminhões pesados e semipesados, que transportam geralmente *commodities* e seu regime de entregas não é *just in time*. Como potenciais mercados para a mudança de modais, no transporte ferroviário, foram estabelecidos os seguintes produtos: soja em grão, minério de ferro, minerais metálicos não ferrosos e minerais metálicos. Como potencial mercado para a mudança de modais, no transporte hidroviário, foram considerados soja em grão, minério de ferro e minerais metálicos. A Tabela 99 estabelece, ano a ano, como se dá a transferência, bem como os valores absolutos em TKU transferidos desses produtos para os diferentes modais.

Tabela 99 – Proporção de Mudança Modal no Transporte de Carga (por Produto)

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Rodoviário para ferroviário (%)	5%	25%	30%	35%	40%	50%	60%
Rodoviário para hidroviário (%)	5%	15%	20%	25%	30%	30%	30%
Rodoviário para ferroviário (10 ⁶ TKU)	3.524	19.132	24.994	32.433	40.605	56.415	71.730
Rodoviário para hidroviário (10 ⁶ TKU)	6.765	21.503	30.784	42.708	56.142	62.402	66.118

Fonte: Elaboração própria

6.1.2.1 EVOLUÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS

A evolução da frota de veículos está atrelada à venda de veículos de cada classe e à curva de sucateamento considerada para veículos a ciclo diesel. A Tabela 73 (cenário REF) indica a evolução da venda de veículos pesados. É importante salientar que, neste estudo, será considerado que 20% da frota de veículos comerciais leves são movidos a diesel e considerados como parte da frota de veículos de transporte de cargas.

A projeção das vendas de veículos pesados por cada classe, conforme descrito no item 1.2.2, é ajustada para atender o cenário macroeconômico previsto de crescimento das mercadorias transportadas. Além disso, a quantidade de TKU transferida do modal rodoviário para outros modais também diminui a atividade do setor, reduzindo a venda de veículos. Os resultados podem ser vistos na Figura 112. Destaca-se ainda que grande parcela das vendas é da classe pesada e semipesada.

Nos anos de 2020 e 2045, há expectativa de queda na venda global de veículos. A queda ocorre por alguns fatores conjuntos, sendo o principal a elevada venda de veículos pesados realizada nos anos anteriores, aumentando significativamente a frota de veículos para transporte de carga em 2020 e 2045. Somam-se a isso a redução da participação do modal rodoviário no transporte de cargas e a estagnação do crescimento das *commodities* em relação ao período anterior nos anos em questão.

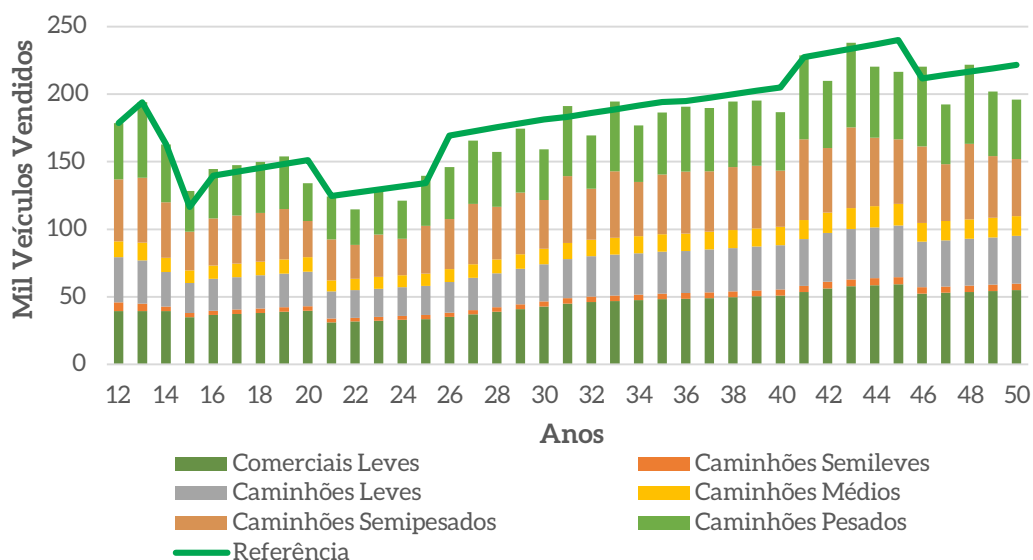


Figura 112 – Vendas de Veículos – Transporte de Carga – Baixo Carbono

Fonte: Elaboração própria

A partir da projeção das vendas de veículos pesados no horizonte 2050 e assumindo que o perfil de sucateamento dos veículos permanecerá constante ao longo do período de análise, conforme apresentado na Figura 98 (cenário REF), pôde-se determinar a frota de veículos pesados, conforme exibido na Figura 113.

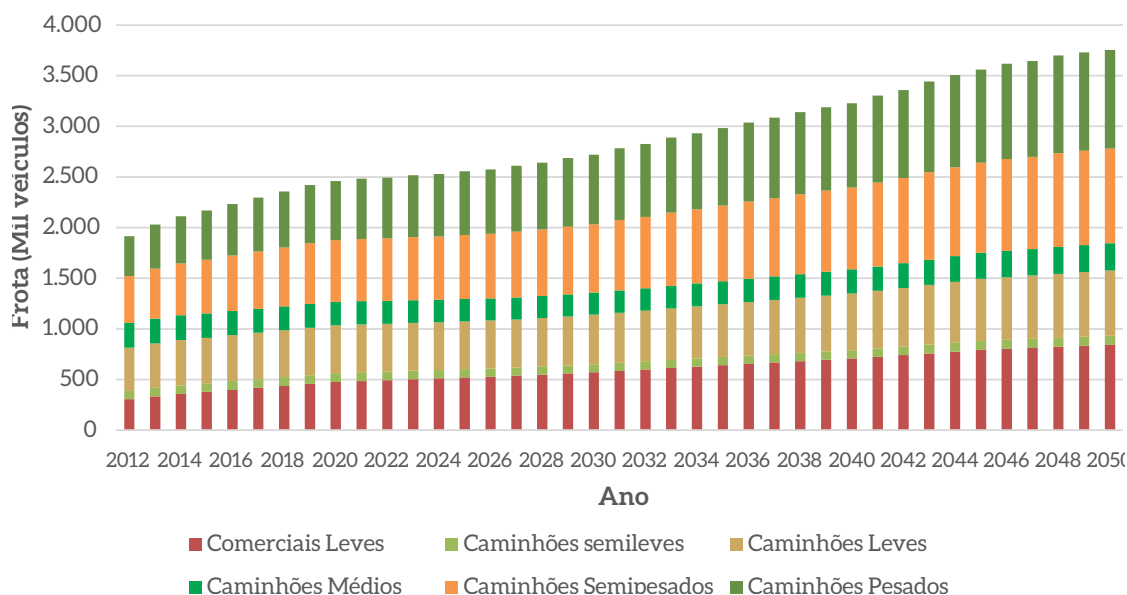


Figura 113 – Frota de Veículos de Carga – Baixo Carbono

Fonte: Elaboração própria

A participação dos veículos pesados e semipesados continua destacada diante dos outros modais, assim como no cenário REF. As alterações previstas no cenário BC reduzem a frota, que sai de 3,9 milhões no cenário REF para 3,75 milhões no cenário BC.

6.1.2.2 EVOLUÇÃO DA INTENSIDADE DE USO

A intensidade de uso, medida em quilômetros rodados por ano, no cenário BC é mantida constante em relação ao ano-base de forma semelhante ao cenário REF.

6.1.2.3 EVOLUÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO

O cenário BC considera inserções tecnológicas que permitirão a redução do consumo específico dos veículos, além da mudança de modal descrita anteriormente. Não se considera, neste estudo, portanto, qualquer efeito secundário, como aumento da venda de veículos, fruto do aumento da competitividade do setor.

Nesse cenário, considera-se que o potencial de eficiência energética é mais bem aproveitado, com a formação de pacotes tecnológicos veiculares mais avançados, permitindo ganhos de eficiência, entre 2013 e 2050, em relação aos apresentados no capítulo 5 (Tabela 75). Para elaboração desse cenário, portanto, a discussão detalhada de cada tecnologia, bem como sua forma de inserção, torna-se ponto-chave para o estudo. Cabe destacar que o termo “tecnologia” é utilizado neste estudo tanto para indicar ações diretas, como a substituição simples de equipamentos, quanto ações indiretas, como melhorias na manutenção dos veículos.

Como metodologia para a inserção tecnológica, os avanços que geram ganhos de eficiência energética dos veículos foram divididos em duas categorias. Na primeira, estão inseridas as tecnologias e adequações que fazem efeito apenas em veículos novos. Nesse caso, uma vez que a tecnologia é inserida no mercado, apenas os veículos fabricados a partir do ano de inserção da tecnologia terão seu consumo específico afetado. Os pacotes tecnológicos formados no cenário BC tomam como base as descrições acerca das tecnologias, apresentadas no capítulo 3.

A segunda categoria de avanços de consumo específico inclui as tecnologias cuja inserção pode ser feita também em veículos usados, na forma de *retrofit*. O Quadro 7 descreve os grupos de tecnologias inseridos em cada categoria. É importante notar que alguns grupos de tecnologias podem ser inseridos em ambas as categorias. É o caso dos pneus, por exemplo, que uma vez inseridos no mercado podem ser fornecidos sempre junto com os veículos novos, mas também podem ser fornecidos a veículos da frota mais antiga. A descrição detalhada das tecnologias se encontra no capítulo 3.

Quadro 7 – Inserção de Tecnologias

Tecnologia Inserida em Veículos Novos	Tecnologia Inserida na Frota Existente
Ações de manutenção, aerodinâmica, redução de massa, pneus, motores, tração/ transmissão, redução de tempo ocioso	Aerodinâmica e pneus

Fonte: Elaboração própria

Em ambas as categorias (veículos novos e usados), considera-se que, por similaridade construtiva, a inserção tecnológica em veículos comerciais leves, caminhões semileves e caminhões leves seria igual, bem como no caso dos caminhões semipesados e pesados. Caminhões médios formam, por si só, uma classe única dentro desse critério.

Como forma de gerar critérios bem definidos para a inserção tecnológica ao longo do tempo, as tecnologias referentes à categoria de veículos novos foram divididas quanto à sua maturidade tecnológica. Logo, cada faixa de maturidade tecnológica atende um critério de inserção ao longo do tempo, descrito no Quadro 8.

Quadro 8 – Inserção Tecnológica ao Longo do Tempo

Categoria	Data de Inserção da Tecnologia	Ano em que Atinge seu Potencial Máximo
Tecnologia disponível	Inserida a partir de 2013	Potencial máximo em 10 anos
Tecnologia madura	Inserida a partir de 2017	Potencial máximo em 10 anos
Tecnologia em teste	Inserida a partir de 2022	Potencial máximo em 10 anos
Tecnologia em desenvolvimento	Inserida a partir de 2028	Potencial máximo em 2050
Tecnologia inovadora	Inserida a partir de 2038	Potencial máximo em 2050

Fonte: Elaboração própria a partir de CANADA/NRC, 2010; IEA, 2012b; CANADA/NRC, 2011; ICCT, 2009; KROMER; BOCKHOLT; JACKSON, 2009; LIIMATAINEN et al., 2014

O cenário BC, na categoria de veículos novos, considera como base a relação entre os grupos tecnológicos disponíveis e maduros (Quadro 9). Os demais, em face da indisponibilidade comercial, serão objeto de análise do cenário de baixo carbono com inovação (BC+I).

Quadro 9 – Níveis de Maturidade Tecnológica

Tecnologia	Maturidade no Cenário BC
Ações de manutenção	Tecnologia disponível
Aerodinâmica	Tecnologia madura
Redução de massa	Tecnologia disponível
Pneus	Tecnologia madura
Motores	Parte tecnologia disponível parte tecnologia madura
Tração/Transmissão	Tecnologia madura
Redução de tempo ocioso	–

Fonte: Elaboração própria a partir de CANADA/NRC, 2010; IEA, 2012b; CANADA/NRC, 2011; ICCT, 2009; KROMER; BOCKHOLT; JACKSON, 2009; LIIMATAINEN et al., 2014

Com base na descrição tecnológica feita no capítulo 3, cada grupo tecnológico teve um detalhamento de quais seriam as tecnologias efetivamente inseridas, sendo que eficiência evolui de forma gradativa, desde o seu ano de inserção até o seu valor máximo, definido no critério de maturidade (Quadro 8). O conjunto das tecnologias é o pacote tecnológico descrito na Tabela 100.

Tabela 100 – Pacote Tecnológico

Tecnologia	Pacote Tecnológico	Ganho Máximo de Eficiência
Ações de manutenção	Tecnologia disponível – calibragem de pneus e alinhamento correto de rodas	2%
Aerodinâmica	Tecnologia madura – inserção do pacote aerodinâmico completo	5%
Redução de massa	Tecnologia disponível – utilização de ligas metálicas e materiais leves	2,4%
Pneus	Tecnologia madura – pneus com baixa resistência de rolamento	3%
Motores	Tecnologia disponível (TD): Configuração de 2 turbocompressores, controle de válvulas Tecnologia madura (TM): <i>turbocompounding</i> mecânico, sistema de partida e parada, eletrificação de sistemas, avanço no sistema térmico	TD – 3% TM – 9%
Tração/Transmissão	Tecnologia Madura: Redução de atrito	2%

Fonte: Elaboração própria a partir de CANADA/NRC, 2010; IEA, 2012b; CANADA/NRC, 2011; ICCT, 2009; KROMER; BOCKHOLT; JACKSON, 2009; LIIMATAINEN et al., 2014

Os ganhos percentuais destacados na Tabela 100 para cada tecnologia individualmente não são aditivos (CANADA/NRC, 2010). Para cada classe de veículos, o percentual de ganho percentual total (%FCR_{pacote}) está associado à combinação dos ganhos individuais das tecnologias (%FCR_{tecN}), como mostrado na Equação 23:

$$\%FCR_{\text{pacote}} = 100 \left\{ 1 - \left[1 - (\%FCR_{\text{Tec1}}/100) \right] \right\} \left[1 - (\%FCR_{\text{Tec2}}/100) \right] \dots \left[1 - (\%FCR_{\text{TecN}}/100) \right]$$

(Eq. 23)

Para a segunda categoria de inserção tecnológica, voltada para veículos usados, os pacotes tecnológicos são os mesmos da categoria de veículos novos, e sua inserção se inicia no mesmo momento. O que muda nessa categoria é que a avaliação da penetração dessa tecnologia diante do restante da frota é um fator importante. De maneira similar à categoria anterior, de forma a ter uma base de comparação entre as tecnologias, os grupos tecnológicos foram divididos de acordo com os critérios apresentados na Tabela 101.

Tabela 101 – Penetrabilidade Tecnológica

Penetrabilidade	% de Inserção
Boa penetrabilidade	Chega ao potencial de 70% da frota
Média penetrabilidade	Chega ao potencial de 50% da frota
Baixa penetrabilidade	Chega ao potencial de 30% da frota

Fonte: Elaboração própria a partir de CANADA/NRC, 2010; IEA, 2012b; CANADA/NRC, 2011; ICCT, 2009; KROMER; BOCKHOLT; JACKSON, 2009; LIIMATAINEN et al., 2014

O potencial máximo de inserção é alcançado em 2050 e sua evolução acontece de forma constante ao longo dos anos, desde o primeiro ano em que a tecnologia foi inserida até o último (2050). Essa análise resulta na autonomia de veículos novos mostrada na Figura 114. A evolução das eficiências se dá de forma gradativa, à exceção dos anos de 2010 e 2011, no caso de veículos leves movidos a diesel. Um dos principais motivos para a ruptura dessa tendência foi a implantação da fase P5 do Programa de Emissões de Controle Veiculares (Proconve). Nessa fase, mais especificamente entre os anos de 2009 e 2010, houve redução dos fatores de emissão requeridos, em especial nos índices de NOx que chegaram a uma redução de 50% (BRASIL/MMA, 2014). Como esse fator de emissão tem impacto direto sobre a eficiência, seus efeitos foram sentidos nos anos subsequentes.

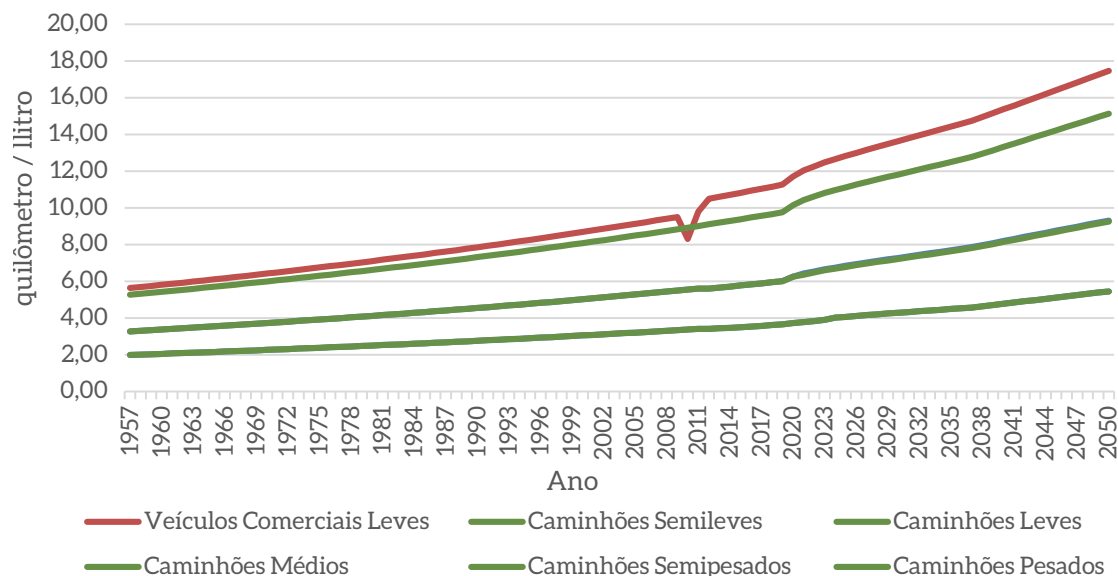


Figura 114 – Projeção Consumo Específico dos Veículos Pesados

Fonte: Elaboração própria

Nota-se que a evolução quanto à autonomia dos veículos novos se dá, em média, para todo o período entre 2012 e 2050, com aumentos, em base anual, de 1,35% para veículos comerciais leves e caminhões leves, 1,33% para caminhões médios e 1,25% para caminhões semipesados e pesados.

6.1.1.4 EVOLUÇÃO DO FATOR DE OCUPAÇÃO

No cenário BC, não foi considerada alteração do fator de ocupação (toneladas transportadas por veículo de carga) em relação ao cenário REF.

6.1.1.5 CUSTOS E POTENCIAL DE ECONOMIA

Com base nas informações levantadas no capítulo 3, foi avaliado o custo inerente a cada pacote tecnológico com inserção no cenário BC. Esses custos estão descritos na Tabela 102.

Tabela 102 – Custo de Cada Pacote Tecnológico

Tecnologia	Pacote Tecnológico no Cenário BC	Custo de Capital por Veículo (US\$)
Ações de manutenção	Tecnologia disponível – calibragem de pneus e alinhamento correto de rodas	–
Aerodinâmica	Tecnologia madura – inserção do pacote aerodinâmico completo	4.000
Redução de massa	Tecnologia disponível – utilização de ligas metálicas e materiais leves	3.500
Pneus	Tecnologia madura – pneus com baixa resistência de rolamento	240
Motores	Tecnologia disponível – configuração de dois turbocompressores, controle de válvulas	4.600
	Tecnologia madura – <i>turbocompounding</i> mecânico, sistema de partida e parada, eletrificação de sistemas, avanço no sistema térmico	11.900
Tração/Transmissão	Tecnologia madura – redução de atrito	200
Inserção de tecnologias em desenvolvimento	Pacote tecnológico ainda em desenvolvimento composto de os subsistemas	882

Fonte: Elaboração própria a partir de CANADA/NRC, 2010; IEA, 2012b; CANADA/NRC, 2011; ICCT, 2009; KROMER; BOCKHOLT; JACKSON, 2009; LIIMATAINEN et al., 2014

É importante notar que, nesses custos, em dólar, contabiliza-se o valor adicional a ser inserido no preço final do veículo. Sabe-se que outras questões também influenciam os critérios de decisão dos agentes atuantes no setor, desde empresas que teriam ganhos operacionais com a inserção tecnológica a fabricantes de veículos, e que o *payback* de cada tecnologia em face do custo dos combustíveis por si só não é suficiente para garantir a quebra de barreira para a inserção tecnológica. Investimentos em linhas de montagem, por exemplo, figuram entre outras ações necessárias a serem fomentadas.

6.2 MODAL FERROVIÁRIO

6.2.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

6.2.1.1 EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE PASSAGEIROS-KILÔMETRO

No cenário BC, consideram-se a ampliação, modernização e criação das novas linhas e estações previstas para o sistema metroviário em consonância com as previsões de investimento no setor (BRASIL/ANTT, 2014g; BRASIL/EPL, 2014b). Nesse cenário, é prevista também a elaboração de políticas públicas voltadas para a restrição do uso de transporte privado e estímulo ao transporte público. Assim, estima-se crescimento acumulado de 580% até 2050, com o total de passageiros-quilômetro passando de 28 bilhões/ano, em 2012, para 165 bilhões/ano, em 2050. A Tabela 103 mostra as estimativas do indicador de atividade desse segmento para o Brasil no cenário BC, comparativamente aos valores considerados no cenário REF.

Tabela 103 – Evolução pkm Ferroviário – Cenários REF e BC

Ano	2013	2020	2030	2040	2050
pkm metroviário (10 ⁹) – referência	28	30	50	75	90
pkm metroviário (10 ⁹) – baixo carbono	28	31	75	130	165

Fonte: Elaboração própria

6.2.1.2 EVOLUÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO

No que respeita ao consumo específico, estima-se, para o cenário BC, o aumento da eficiência do sistema metroviário, no horizonte 2050, de forma semelhante ao cenário REF, passando de 0,07 KWh/pkm, em 2013, para 0,09 kWh/pkm, 2050.

6.2.2 TRANSPORTE DE CARGA

6.2.2.1 EVOLUÇÃO DA FROTA DE VAGÕES

A premissa adotada para a evolução da frota no cenário BC, de forma semelhante ao cenário REF, é que a quantidade de vagões deve aumentar de acordo com o crescimento previsto para a carga bruta.

No entanto, no cenário BC, considera-se também que certas *commodities* são migradas do modal rodoviário para o ferroviário e aquaviário, dada a maior capacidade que esses modais têm de transportar produtos mais pesados e em maior quantidade. Desse modo, considera-se a migração de soja, minério de ferro, minerais metálicos não ferrosos e minerais não metálicos para o transporte ferroviário. A quantidade, em milhão de TKU, de cada produto acrescida a esse modal é apresentada na Tabela 104.

Tabela 104 – Mudança Modal – Migração para o Ferroviário (10⁶ TKU)

Produto	2013	2020	2030	2040	2050
Soja	0	1.138	7.307	11.801	20.847
Minério de ferro	0	941	7.927	12.988	22.944
Minerais metálicos não ferrosos	0	163	1.150	1.868	3.299
Minerais não metálicos	0	1.281	8.610	13.949	24.640
Total	0	3.523	24.994	40.606	71.730

Fonte: Elaboração própria

Deve-se levar em consideração que tais quantidades são acrescentadas aos valores já projetados para o crescimento de cada produto, segundo estabelecido anteriormente. Assim, mantendo-se a participação de cada concessionária na movimentação dos produtos, obtém-se a frota de vagões para acompanhar o aumento da demanda, conforme apresentado na Tabela 105.

Tabela 105 – Quantidade de Vagões por Concessionária – Baixo Carbono

Concessionária	2013	2020	2030	2040	2050
ALLMN	5.223	6.107	7.583	8.855	9.996
ALLMO	1.268	1.523	1.704	1.970	2.291
ALLMP	3.206	3.756	4.777	5.618	6.323
ALLMS	12.258	14.332	18.020	21.161	23.937
EFC	12.738	15.564	17.187	19.968	23.507
EFVM	18.826	22.881	25.612	29.820	35.005
FCA	13.115	15.333	19.256	22.652	25.732
FERROESTE	73	85	105	123	139
FNS	652	770	947	1.105	1.251
FTC	373	450	676	816	895
MRS	19.364	23.514	26.466	30.857	36.220
TLSA	1.841	2.177	2.796	3.346	3.853
Total	88.936	106.493	125.131	146.291	169.148
Incremento em relação referência	0	831	4.825	5.969	8.001

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da BRASIL/ANTT, 2013b

6.2.2.2 EVOLUÇÃO DA INTENSIDADE DE USO

O cenário BC prevê a mesma evolução da distância média a ser percorrida por vagão estimada para o cenário REF. A expansão será proporcional ao aumento previsto da infraestrutura da malha ferroviária.

6.2.2.3 EVOLUÇÃO DO FATOR DE OCUPAÇÃO

O comportamento do fator de ocupação do sistema ferroviário de carga no cenário BC é mantido constante ao longo da simulação, de forma semelhante ao cenário REF.

6.2.2.4 EVOLUÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO

Para a realização do cenário BC, o enfoque do modal ferroviário ficou na implementação de tecnologias que visem a maior eficiência no consumo de combustível. Devido à inexistência de referências relativas ao emprego de tecnologias mais eficientes à frota ferroviária brasileira, analisaram-se pesquisas e programas internacionais com esse enfoque. Desse modo, por meio de um relatório de um estudo europeu (ANDERSSON et al., 2011), pôde-se traçar um cenário de implementação de medidas de baixo carbono em trens brasileiros movidos a diesel. O cenário do estudo analisa a implementação das seguintes medidas:

- Redução do arrasto: trens com menor arrasto têm potencial de redução de até 10% no consumo de energia. Pode ser obtido pela otimização do espaço nos trens, implementação de vagões flexíveis e melhor traçado aerodinâmico;
- Carga compacta: menor tara (peso do veículo) dos vagões pode promover a movimentação de bens mais pesados em cada vagão, mantendo o limite de massa permitido. Propicia redução de energia por tkm em casos em que a massa do vagão é um fator limitante;
- Maquinário mais eficiente: locomotivas movidas a diesel apresentam potencial de redução de consumo de até 8% ao longo do tempo;
- Condução ecoconsciente: são práticas de condução que permitem redução de energia de 8% a 10% em alguns casos. A direção pode ser otimizada por programas de computador que sinalizam ações ao condutor. Atualmente, essa tecnologia existe comercialmente, mas exige um tempo para penetração no mercado estimado em cerca de cinco anos. No longo prazo, pode ser coordenada com controle do tráfego, que aumentaria ainda mais a eficiência do modal (ANDERSSON et al., 2011).

A combinação de tais tecnologias permite ganho de eficiência representado por cerca de 58% no consumo específico original dos trens. Dessa forma, a partir de 2020, ano estipulado para a implementação de tais medidas, o consumo em litros por milhares de TKU, por concessionária, reduzirá gradualmente até alcançar, em 2030, a plena implementação das medidas, atingindo 58% do consumo específico apresentado para o ano-base considerado no estudo.

Considera-se também que as locomotivas responsáveis pelo transporte de carga permanecerão operando durante o horizonte de tempo proposto com motor a diesel. Assume-se essa tendência, que é o tipo de tração predominante no modal ferroviário brasileiro, sendo considerado relativamente eficiente sob o ponto de vista de consumo de combustível, quando comparado a outros modais. A Tabela 106 apresenta o consumo específico calculado por concessionária.

Tabela 106 – Consumo Específico (em L/mil TKU) por Concessionária

Concessionária	2013	2020	2030	2040	2050
ALLMN	2,37	1,37	1,37	1,37	1,37
ALLMO	15,94	10,59	9,17	9,17	6,77
ALLMP	14,04	8,07	8,07	8,07	8,07
ALLMS	9,29	5,34	5,34	5,34	5,34
EFC	2,10	1,21	1,21	1,21	1,21
EFVM	2,78	1,60	1,60	1,60	1,60
FCA	11,17	6,42	6,42	6,42	6,42
FERROESTE	13,82	7,95	7,95	7,95	7,95
FNS	4,10	2,36	2,36	2,36	2,36
FTC	6,72	3,87	3,87	3,87	3,87
MRS	4,41	2,53	2,53	2,53	2,53
TLSA	15,57	8,96	8,96	8,96	8,96
Geral	8,52	5,02	4,90	4,90	4,70
Variação em relação ao cenário REF	0,00%	-36,8%	-31,7%	-24,5%	-20,0%

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da BRASIL/ANTT, 2013b; ANDERSSON et al., 2011

6.2.2.5 CUSTOS E POTENCIAL DE ECONOMIA

Com a implementação de novas tecnologias para a frota ferroviária, são incorridos custos associados a essas medidas. Cada tecnologia mencionada – redução do arrasto, carga compacta, maquinário mais eficiente e condução mais ecoconsciente – tem um determinado custo ao ser implementada em novos vagões. Para vagões operando por combustão a diesel, o estudo de Andersson et al. (2011) considera um cenário de implementação de todo o pacote, o que implica custo total menor que a soma de todas as tecnologias empregadas individualmente, dado que há custos comuns que são diluídos com a aplicação de todo o pacote. O estudo prevê que o pacote de tecnologias utilizado estabelece custo de cerca de € 3,27 milhões por locomotiva (ANDERSSON et al., 2011).

O relatório da ANTT prevê, além da quantidade de vagões, o número de locomotivas por concessionária. Mantendo-se a relação de vagões por locomotiva do ano de 2013 para os anos seguintes, foi possível estimar a quantidade de locomotivas para cada ano, dada a projeção do número de vagões realizada nesse cenário. Como não há dados referentes à venda de locomotivas, foi considerada a diferença entre a frota de um ano para outro para a estimativa de novas locomotivas, de modo que a penetração do pacote de tecnologias ocorre apenas para a nova frota. Assim sendo, chega-se a um valor final dos custos incorridos pela adoção dessas medidas por concessionária, conforme apresenta a Tabela 107.

Tabela 107 – Custo Total (US\$/2011) para a Implementação do Pacote de Tecnologias

Concessionária	2013	2020	2030	2040	2050
ALLMN	–	30.672.463	24.595.101	21.002.545	25.683.664
ALLMO	–	7.074.552	2.573.493	2.167.191	2.976.010
ALLMP	–	35.735.352	32.330.946	27.036.795	26.488.936
ALLMS	–	83.170.447	69.420.335	60.568.163	76.958.720
EFC	–	30.698.468	9.598.138	8.153.410	12.506.112
EFVM	–	38.871.269	15.017.857	13.102.002	18.986.555
FCA	–	237.174.375	196.567.175	177.584.465	276.195.590
FERROESTE	–	2.880.592	2.263.726	2.025.825	3.125.996
FNS	–	2.798.548	2.140.337	1.904.382	2.960.283
FTC	–	1.464.582	1.872.043	1.708.359	1.565.623
MRS	–	107.080.488	48.027.387	42.370.666	62.323.324
TLSA	–	13.085.316	12.383.854	11.124.109	11.111.867
Total	–	590.706.451	416.790.393	368.747.913	520.882.679

Fonte: ANDERSSON et al., 2011

6.3 MODAL AÉREO

6.3.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

6.3.1.1 EVOLUÇÃO DO FATOR DE OCUPAÇÃO

Para o cenário BC, a taxa de ocupação média (considerando voos internacionais e domésticos) cresce de forma similar ao cenário REF, passando do patamar de 77% em 2012 para um patamar de 80% em 2050, cujo resultado equivale ao *benchmarking* da indústria nos padrões atuais.

6.3.1.2 EVOLUÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO

O parâmetro de intensidade energética do setor de transporte aéreo de passageiros reflete os ganhos em termos de eficiência energética cujo efeito seja realizado sobre a variação de consumo de querosene de aviação, medido em litros por assento-quilômetro. A projeção do parâmetro de intensidade energética na aviação segue como base o valor obtido para o ano de 2012, conforme exibido na Equação 24.

$$I_{2012} = 38.530 \text{ ASK/m}^3 \quad (\text{Eq. 24})$$

No caso do cenário BC, o indicador de eficiência é composto por ganhos operacionais e tecnológicos. Os ganhos operacionais incluem o aprimoramento do sistema de gerenciamento de tráfego aéreo (ATAG, 2010), que permite redução, no horizonte 2050, de 5% no consumo de combustível do modal (MCCOLLUM; GOULD; GREENE, 2009), e o desenvolvimento de ferramentas de planejamento e gestão de voo, que permitem cálculo mais preciso do combustível necessário para a viagem e melhor distribuição de peso na aeronave. De acordo com ATAG (2010), essas medidas podem reduzir o consumo de combustível de uma aeronave em até 0,5%. Do ponto de vista tecnológico, esse cenário considera melhorias aerodinâmicas e redução de massa das aeronaves. Destaca-se que tais medidas praticamente não refletem em custos adicionais para as companhias aéreas e podem ser consideradas desprezíveis se comparadas ao valor total da aeronave, podendo, inclusive, ser implementadas nas aeronaves em operação. Esse aspecto torna irrelevante a obtenção de custos de implementação das medidas.

Dessa forma, o consumo em litros por passageiro-quilômetro, no cenário BC, evolui de um patamar de 0,026 em 2012 para 0,013 em 2050, como exibido na Tabela 108. No período, a eficiência cresce em média 1,8% a.a.

Tabela 108 – Eficiência Energética das Aeronaves (litros/ASK) – Cenários REF e BC

Ano	2013	2020	2030	2040	2050
Eficiência – REF	0,025	0,025	0,022	0,019	0,016
Eficiência – BC	0,025	0,025	0,022	0,017	0,013

Fonte: Elaboração própria

6.3.1.3 EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE ASSENTOS-QUILÔMETROS

A evolução do número de assentos-quilômetro (ASK) no cenário BC ocorre de forma semelhante ao cenário REF, sendo vinculada à taxa de crescimento do PIB a partir de uma elasticidade-renda da demanda. Para o horizonte 2050, considera-se, assim como no cenário REF, uma elasticidade-renda de 2,0 até 2030, com redução para 1,5 entre 2030-2050.

6.3.2 TRANSPORTE DE CARGA

6.3.2.1 EVOLUÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO

Para o transporte aéreo de carga, assumem-se as mesmas hipóteses para modificação operacional e tecnológica das aeronaves consideradas no cenário REF, de forma que o parâmetro de intensidade energética passa de 40,7 litros por tonelada-quilômetro transportada, em 2012, para 38,6 litros por tonelada-quilômetro transportada, em 2050, refletindo ganho de 5% de eficiência no período.

6.3.2.2 EVOLUÇÃO DO NÍVEL DE ATIVIDADE

Para projeção do número de toneladas-quilômetro transportadas (TKU), adota-se a mesma premissa do cenário REF de que esse indicador seria função da dinâmica do comércio internacional de exportações e importações.

6.4 MODAL HIDROVIÁRIO

6.4.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

6.4.1.1 EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE PASSAGEIROS TRANSPORTADOS

A expectativa de crescimento do transporte aquaviário de passageiros no cenário BC é idêntica ao do cenário REF por não se prever que haverá transferência de modal do transporte rodoviário, aéreo ou ferroviário.

6.4.1.2 EVOLUÇÃO DA INTENSIDADE DE USO

No cenário BC, os quilômetros percorridos pelas embarcações são considerados constantes no período entre 2012 e 2050. Essa consideração decorre da ausência de planejamento público de mudança de destino e origem nas cidades das 317 linhas existentes, como também não há indicação da criação de novas linhas de navegação de passageiros nas duas regiões analisadas.

6.4.1.3 EVOLUÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO

No cenário REF, foi considerado o consumo de combustíveis por passageiro-quilômetro para o horizonte de análise igual à média do período 1996-2012 de 7,37 litros/100pkm. No cenário BC, esse valor é tratado como o consumo específico inicial antes de se praticarem medidas de eficiência energética e assim reduzir o consumo específico médio das embarcações de passageiros. No Quadro 10, constam as ações de eficiência energética passíveis de serem realizadas em embarcações de transporte de passageiros, em consonância com indicadores abordados no capítulo 1, a serem citados novamente na seção de custos deste relatório.

Quanto ao impacto de cada ação proposta, em virtude de a literatura indicar uma faixa de redução de consumo de combustível por embarcação, que varia de um percentual pequeno a um valor máximo, a proposição deste trabalho será classificar o impacto em três níveis, associados à penetração, em que 20% das embarcações terão impacto mínimo, 20% terão impacto máximo e 60% terão impacto de 50% do valor máximo de eficiência energética, conforme indicado no capítulo 3 para cada tipo de medida, seja tecnológica ou operacional. Caso o valor referente a 50% do valor máximo seja inferior ao menor valor daquela medida, será utilizado o mesmo valor intitulado como impacto mínimo.

Quadro 10 – Penetração de Ações de Eficiência Energética nas Embarcações de Passageiros

● Alta Penetração ● Média Penetração ● Baixa Penetração	Embarcações de Passageiros	
R: <i>Retrofit</i> – Embarcação antiga N: Nova embarcação		
Oportunidades de eficiência energética	R	N
Limpeza do casco	●	●
Instalação de rebordos ou grades		●
Piloto automático		●
Tecnologia de combustão <i>common rail</i>	●	●
Polimento da hélice (com monitoramento)	●	●
Controle de velocidade das bombas e dos ventiladores	●	●
Sistema de iluminação mais eficiente	●	●
Sistema de geração de energia solar fotovoltaica		●
Planejamento da rota com previsão climática	●	●

Fonte: Elaboração própria

Quadro 11 – Cronograma de Ações de Eficiência Energética em Embarcações de Passageiros Existentes

Ano	2020-2022	2020-2024
Limpeza do casco		
Tecnologia de combustão <i>common rail</i>		
Sistema de ajuste da injeção do motor		
Polimento da hélice (com monitoramento)		
Controle de velocidade – bombas e ventiladores		
Sistema de iluminação mais eficiente		
Planejamento da rota com previsão climática		

Fonte: Elaboração própria

Apesar da indicação feita pela Instrução Normativa da Secretaria da Receita Federal nº 162/1998 de que a vida útil das embarcações seja de 20 anos e a Antaq apresentar as estatísticas de que as idades médias atuais das embarcações de transporte hidroviário e cabotagem são de 16,5 e 17,0 anos, respectivamente, e ainda que várias embarcações existentes operam há mais 20 de anos (MF, 2014; CNT, 2013a; b), o cenário BC contempla uma proposição de renovação de frota mais conservadora, de acordo com a Tabela 109. É importante ressaltar que um indicador que poderia ser utilizado para estabelecimento da renovação da frota seria os dados de utilização das embarcações em 2012 no que tange à relação da carga transportada *versus* capacidade em TPB, mas não há dados disponíveis.

Tabela 109 – Estimativa da Relação das Novas Embarcações perante o Total

Ano	Novas Embarcações
2020	30%
2025	50%
2030	70%
2035	80%
2040	90%
2050	100%

Fonte: Elaboração própria

Dessa maneira, utilizando as premissas e considerações supracitadas, torna-se possível obter ganhos de eficiência energética anuais até o último ano analisado (2050), que podem ser observados na Tabela 110, indicando somente os anos em que haveria ganhos de eficiência energética de acordo com as hipóteses consideradas e respectivos consumos específicos. Por fim, em 2050, chegar-se-ia ao consumo específico global de 6,59 litros/100pkm para uma embarcação de passageiros típica nacional.

Tabela 110 – Redução Média do Consumo Específico devido às Ações de Eficiência Energética

Ano	Redução do Consumo Específico (%)	Consumo Específico (l/100pkm)
2020	2,60	7,1781
2021	1,75	7,0528
2022	1,75	6,9297
2023	0,02	6,9286
2024	0,02	6,9275
2025	1,86	6,7988
2030	1,24	6,715
2035	0,60	6,674
2040	0,62	6,633
2050	0,60	6,593

Fonte: Elaboração própria

6.4.1.4 CUSTOS E POTENCIAL DE ECONOMIA

A fim de se obter um custo global por embarcação por um ponto percentual de redução de consumo específico e também por faixas de ganhos, consideraram-se as seguintes premissas:

- Total de 626 embarcações de passageiros em 2012, com crescimento anual da frota de 0,5% até 2050 (BRASIL/ANTAQ, 2013c; RJ/IPP, 2014);
- Custo médio das ações de eficiência energética composto por 10% do custo mínimo, 60% da metade do custo máximo e 30% do custo máximo (Tabela 111);
- Custo médio global de ações de eficiência energética é a média ponderada da contribuição de ganho de cada macroação com o seu respectivo custo (Tabela 112);
- Para as novas embarcações, o custo contabilizado somente contempla as tecnologias provedoras de maior eficiência energética, e não o custo da renovação da frota, que seria mandatória pelo seu tempo de utilização.

Tabela 111 – Ganhos de Eficiência e Custos das Tecnologias nas Embarcações de Passageiros

Macroações	Ganhos Mínimo e Máximo (%)	Custos Mínimo e Máximo (US\$)
Redução das resistências hidro e aerodinâmica	0,5 – 15,9	9.754 – 185.088
Otimização do sistema de propulsão	0,1 – 14,6	17.157 – 523.033
Melhoria da concepção energética	0,1 – 8,1	50.662 – 2.012.816
Tecnologias avançadas	1,6 – 7,5	385.576 – 1.837.427

Fonte: BRASIL/ANTAQ, 2011a, 2013b; FABER et al., 2010; ICCT, 2011b

Tabela 112 – Contribuição dos Ganhos Energéticos das Tecnologias nas Embarcações de Passageiros

Macroações	Contribuições dos Ganhos acumulados em 2050 (%)
Redução das resistências hidro e aerodinâmica	32,97
Otimização do sistema de propulsão	55,32
Melhoria da concepção energética	11,13
Tecnologias avançadas	0,58

Fonte: BRASIL/ANTAQ, 2011a, 2013b; FABER et al., 2010; ICCT, 2011b

Desse modo, ocorreria um custo global de US\$ 52.899 por cada embarcação para cada um ponto percentual de redução de consumo específico de óleo diesel marítimo. No tocante à quantidade de embarcações nacionais, a Tabela 113 demonstra os ganhos por período e acumulado e os custos até 2050. Caso sejam realizadas todas as medidas operacionais e tecnológicas de eficiência energética consideradas por este estudo, o ganho global energético seria de 11,05% com custo de cerca de US\$ 393 milhões. A partir do custo das medidas consideradas e da atividade do modal, é possível obter o custo por TKU por ano com a implementação das medidas propostas. Esse procedimento será considerado, posteriormente, para a obtenção dos custos marginais de abatimento dessas atividades em embarcações de passageiros.

Tabela 113 – Ganhos e Custos Acumulados por Período Ocasionados por Ações de Eficiência Energética nas Embarcações de Passageiros Existentes e Novas

Início	Término	Ganho Respectivo (%)	Ganho Acumulado (%)	Custo Acumulado (US\$)
2020	2022	6,09	6,09	210.942.142
2023	2025	1,89	7,98	277.691.236
2030	2035	1,84	9,83	344.955.151
2040	2050	1,22	11,05	392.684.026

Fonte: BRASIL/ANTAQ, 2011a, 2013b; FABER et al., 2010; ICCT, 2011b

6.4.2 TRANSPORTE DE CARGA

Para o cálculo da tonelada-quilômetro útil transportada e, conseqüentemente, para a obtenção do volume de combustível demandado, são utilizadas as informações constantes na Tabela 87, extraídas de relatórios divulgados pela Antaq nos estudos relacionados ao transporte hidroviário e à cabotagem do ano de 2012.

6.4.2.1 EVOLUÇÃO DA CARGA TRANSPORTADA

Para a evolução da carga transportada, em tonelada, no sistema hidroviário e cabotagem, até 2050, utiliza-se a mesma premissa do cenário REF relativa às taxas de crescimento das mercadorias e *commodities* transportadas.

6.4.2.2 EVOLUÇÃO DA INTENSIDADE DE USO

No cenário BC, a evolução da quilometragem média percorrida por grupo de mercadoria segue o comportamento do cenário REF, que é considerada constante ao longo da projeção.

6.4.2.3 EVOLUÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO

No Quadro 12, constam as ações de eficiência energética passíveis de serem realizadas em embarcações de transporte de cargas, em consonância com indicadores abordados no capítulo 1. Quanto ao impacto de cada ação proposta, a proposição deste relatório será idêntica à apresentada na seção referente ao transporte aquaviário de passageiros, classificando o impacto em três níveis, associados à penetração, em que 20% das embarcações terão impacto mínimo, 20% terão impacto máximo e 60% terão impacto de 50% do valor máximo de eficiência energética, conforme valores indicados no capítulo 3 para cada tipo de medida, seja tecnológica ou operacional. Já a renovação da frota das embarcações de carga seguirá a mesma metodologia apresentada para o transporte de passageiros, quando, em 2050, toda a frota atual será substituída.

Quadro 12 – Penetração de Ações de Eficiência Energética nas Embarcações de Carga

Legenda: PE: Petroleiro GR: Graneleiro PC: Porta-contêiner CG: Cargas em geral PA: Passageiros	● Alta penetração ● Média penetração ● Baixa penetração							
	R: <i>Retrofit</i> – Embarcação antiga N: Nova embarcação		PE		GR		PC	
			R	N	R	N	R	N
Oportunidades de eficiência energética								
Redução das resistências hidro e aerodinâmica								
Limpeza do casco			●	●	●	●	●	●
Revestimento especial no casco			●	●	●	●	●	●
Sistema de injeção de ar no casco				●		●		●
Instalação de rebordos ou grades			●	●	●	●	●	●
Piloto automático				●		●		●
Otimização do sistema de propulsão								
Tecnologias de hélice <i>tip winglets</i> ou <i>nozzles</i>			●	●				
Tecnologia de hélice <i>boss cap with fins</i>			●	●	●	●	●	●
Sistema de propulsão integrado com o leme			●	●	●	●	●	●
Tecnologia de combustão <i>common rail</i>			●	●	●	●	●	●
Sistema de ajuste da injeção do motor			●	●	●	●	●	●
Polimento da hélice (com monitoramento)			●	●	●	●	●	●
Melhoria da concepção energética da embarcação								
Reaproveitamento dos gases exaustos			●	●			●	
Controle de velocidade das bombas e ventiladores			●	●	●	●	●	●
Sistema de iluminação mais eficiente			●	●	●	●	●	●
Tecnologias avançadas								
Sistema <i>towing kite</i>				●		●		
Sistema de rotores Flettner				●				
Sistema de geração de energia solar fotovoltaica				●		●		●
Medidas operacionais								
Redução da velocidade em 10%			●	●	●	●	●	●
Planejamento da rota com previsão climática			●	●	●	●	●	●

Fonte: Elaboração própria

Quadro 13 – Cronograma de Ações de Eficiência Energética em Embarcações de Transporte de Carga Existentes

Ano	2020-2022	2020-2024	2025-2029
Limpeza do casco			
Revestimento especial no casco			
Instalação de rebordos ou grades			
Tecnologias de hélice tip winglets ou nozzles			
Tecnologia de hélice <i>boss cap with fins</i>			
Sistema de propulsão integrado com o leme			
Tecnologia de combustão <i>common rail</i>			
Sistema de ajuste da injeção do motor			
Polimento da hélice (com monitoramento)			
Reaproveitamento dos gases exaustos			
Controle de velocidade – bombas e ventiladores			
Sistema de iluminação mais eficiente			
Redução da velocidade em 10%			
Planejamento da rota com previsão climática			

Fonte: Elaboração própria

Sendo assim, ao utilizar as premissas e considerações referenciadas, torna-se possível obter os ganhos de eficiência energética anuais até o último ano analisado (2050), que podem ser observados na Tabela 114, indicando somente os anos em que haveria ganhos de eficiência energética de acordo com as hipóteses consideradas e os respectivos consumos específicos. Por fim, em 2050, chegar-se-ia ao consumo específico global de 6,59 litros/100pkm para uma embarcação de passageiros típica nacional.

Tabela 114 – Redução Média do Consumo Específico devido às Ações de Eficiência Energética nas Embarcações de Carga

Ano	Redução do Consumo Específico (%)	Consumo Específico (l/100pkm)
2020	2,60	7,1781
2021	1,75	7,0528
2022	1,75	6,9297
2023	0,02	6,9286
2024	0,02	6,9275
2025	1,86	6,7988
2030	1,24	6,715
2035	0,60	6,674
2040	0,62	6,633
2050	0,60	6,593

Fonte: Elaboração própria

6.4.2.4 CUSTOS E POTENCIAL DE ECONOMIA

A fim de obter um custo global por embarcação por um ponto percentual de redução de consumo específico e também por faixas de ganhos, consideraram-se as seguintes premissas:

- Total de 1.547 embarcações de carga em 2012, com crescimento anual da frota de 0,5% até 2050 (BRASIL/ANTAQ, 2013c; RJ/IPP, 2014);
- Custo médio das macroações de eficiência energética composto por 10% do custo mínimo, 60% da metade do custo máximo e 30% do custo máximo (Tabela 115);
- Custo médio global de ações de eficiência energética é a média ponderada da contribuição de ganho de cada macroação com o seu respectivo custo (Tabela 116);
- Para as novas embarcações, o custo contabilizado somente contempla as tecnologias provedoras de maior eficiência energética, e não o custo da renovação da frota, que seria mandatória pelo seu tempo de utilização;
- Os custos das medidas operacionais (redução da velocidade em 10% e planejamento da rota com previsão climática) não foram considerados neste estudo por serem pouco representativos.

Tabela 115 – Contribuição dos Ganhos Energéticos das Tecnologias nas Embarcações de Cargas

Macroações	Contribuições dos Ganhos acumulados em 2050 (%)
Redução das resistências hidro e aerodinâmica	29,41%
Otimização do sistema de propulsão	28,60%
Melhoria da concepção energética	19,33%
Tecnologias avançadas	4,08%
Medidas operacionais	18,58%

Fonte: BRASIL/ANTAQ, 2011a, 2013b; FABER et al., 2010; ICCT, 2011b

Desse modo, ocorreria custo global de US\$ 71.855 por cada embarcação para cada um ponto percentual de redução de consumo específico de óleo diesel ou óleo combustível marítimo. Quanto à quantidade de embarcações nacionais, a Tabela 116 demonstra os ganhos por período e acumulado e os custos até 2050. Caso sejam realizadas todas as medidas operacionais e tecnológicas de eficiência energética consideradas por este estudo, o ganho global energético seria de 38,30% com custo de cerca de US\$ 4 bilhões.

Tabela 116 – Ganhos e Custos Acumulados por Período Ocasionados por Ações de Eficiência Energética nas Embarcações de Cargas Existentes e Novas

Início	Término	Ganho Respetivo (%)	Ganho Acumulado (%)	Custo Acumulado (US\$)
2020	2022	7,45%	7,45%	830.570.898
2023	2025	7,48%	14,93%	1.634.478.735
2030	2035	9,33%	24,25%	2.584.189.168
2040	2050	14,05%	38,30%	4.069.866.939

Fonte: FABER et al., 2010; BRASIL/ANTAQ, 2011a, 2013b; ICCT, 2011b

6.4.2.5 MUDANÇA DE MODAL E CUSTOS EM INFRAESTRUTURA NECESSÁRIOS

Diante da possibilidade de mudança do modal rodoviário para o hidroviário de algumas *commodities*, como soja, minério de ferro e minerais não metálicos, foi prevista, no cenário BC, transferência gradativa dos fluxos de transportes de algumas mercadorias do modal rodoviário para o aquaviário, considerando as *commodities* passíveis dessa migração de acordo com o Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT) e o Plano Hidroviário Estratégico (PHE). A Tabela 117 demonstra essa migração de fluxo do transporte rodoviário de cargas para o hidroviário de forma quinquenal em TKU. Cabe destacar que não foi considerada a mudança de modal para o transporte de cabotagem, em consonância com o PNLT (SEP/PR, 2012).

Tabela 117 – Mudança de Modal do Transporte Rodoviário para o Hidroviário

Ano	Mudança de Modal (10°TKU)
2020	6,76
2030	30,78
2040	56,14
2050	66,12

Fonte: Elaboração própria

Quanto aos custos necessários para a ocorrência dessa mudança de modal, uma referência é o próprio PNLT, que até 2031 prevê migração de 1.360 bilhões de TKU para o modal hidroviário e considera ainda como requisito investimentos de R\$ 79,15 bilhões (SEP/PR, 2012). Com isso, por meio de uma razão direta, obtivemos dispêndio de 0,058 reais por TKU transferido do modal rodoviário para o hidroviário que serve como referência para uma análise de custos de transferência de modal.

6.5 PROJEÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE GEE

Nesta seção, são apresentados os resultados do cenário BC, com foco nas projeções de consumo energético e emissões de GEE no setor de transportes no Brasil, para o período 2013-2050.

O cenário BC desenvolvido considera mudanças qualitativas estruturais do setor que aceleram o ritmo de incorporação de tecnologia de combustíveis ambientalmente menos danosos. Ou seja, consideram-se: maior penetração de práticas/tecnologias de uso mais eficiente de energia; maior substituição interenergética em favor de combustíveis menos poluentes; e maior substituição intermodal.

De acordo com as projeções realizadas, apresentadas na Tabela 118 e na Figura 115, o óleo diesel continua a ser o combustível mais consumido pelo setor de transportes no Brasil, cuja representatividade permanece no patamar de 45% ao longo do horizonte de análise. Todavia, em termos absolutos, o consumo de diesel nesse cenário, em 2050, é 26% inferior ao cenário REF devido às políticas de eficiência energética consideradas. O álcool etílico, por sua vez, aumenta a participação na matriz, alcançando 15% do consumo do setor, em 2050, como consequência do maior uso de etanol nos veículos flexíveis. A eletricidade é o vetor energético que mais cresce no período analisado, em média 7,9% ao ano, fruto da entrada dos veículos elétricos e híbridos *plug-in* no transporte privado e do uso mais intenso do transporte ferroviário de passageiros. O segundo combustível com maior crescimento no cenário é o biodiesel, com crescimento médio de 3,8% ao ano. No tocante ao cenário REF, a redução de consumo de energia atinge o patamar de aproximadamente 30% em 2050, fruto das medidas de eficiência energética consideradas e da redução da atividade veicular privada.

Tabela 118 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Combustível (mil tep) – Baixo Carbono

	2013	2020	2030	2040	2050
Óleo diesel	41.246	46.899	43.829	47.168	49.855
Biodiesel	3.074	5.157	10.794	11.582	12.230
Álcool etílico anidro	5.237	6.370	6.483	5.168	3.773
Álcool etílico hidratado	6.803	14.161	19.645	17.983	12.899
Gasolina automotiva	19.909	24.217	24.644	19.647	14.342
Gás natural veicular	1.340	1.656	1.167	528	150
Querosene de aviação	5.949	8.965	13.042	14.334	12.794
Biojet	0	0	0	0	40
Óleo combustível	1.139	1.505	1.822	2.129	2.214
Eletricidade	162	188	522	1.505	2.701
Total	84.861	109.119	121.948	120.045	110.999

Fonte: Elaboração própria

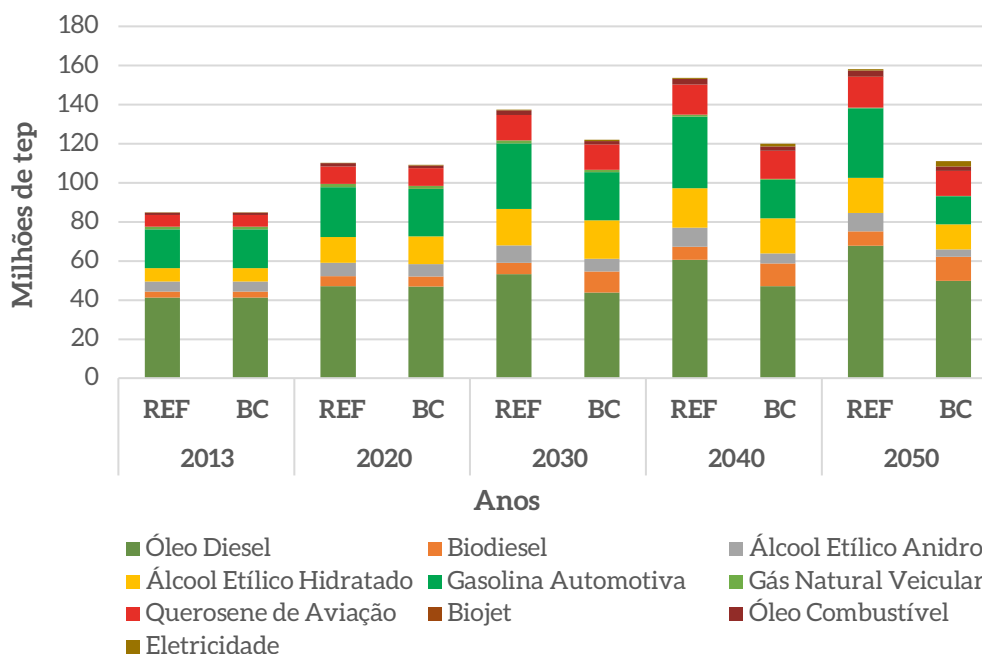


Figura 115 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Combustível

Fonte: Elaboração própria

Do ponto de vista dos modais de transporte, o modal rodoviário permanece como o segmento mais representativo do setor de transportes, como exibido na Tabela 119 e na Figura 116. Cabe enfatizar que o comportamento de longo prazo do setor sofre influência das variáveis socioeconômicas consideradas no período. O modal ferroviário aumenta sua participação nas matrizes de passageiros e carga em função das medidas de incentivo ao transporte público de passageiros e mudança modal com relação ao transporte rodoviário de carga. Dessa forma, o consumo do modal ferroviário no cenário cresce, em média, 3,0% ao ano, no horizonte 2050. Esse aumento representa, em 2050,

consumo 33% superior do modal em relação ao cenário REF. O modal rodoviário, por sua vez, reduz sua participação no consumo energético do setor em 32%, em 2050, em relação ao cenário REF. Destaca-se, ainda, que, para o ano de 2013, os valores obtidos na simulação estão em conformidade com os valores fornecidos pelo Balanço Energético Nacional (BRASIL/EPE, 2014a).

Tabela 119 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Modal (mil tep) – Baixo Carbono

Modal	2013	2020	2030	2040	2050
Rodoviário	75.835	96.503	104.482	99.733	90.637
Ferrovial	1.418	1.529	1.819	2.876	4.249
Hidroviário	1.658	2.122	2.605	3.102	3.279
Aéreo	5.949	8.965	13.042	14.334	12.834
Total	84.861	109.119	121.948	120.045	110.999

Fonte: Elaboração própria

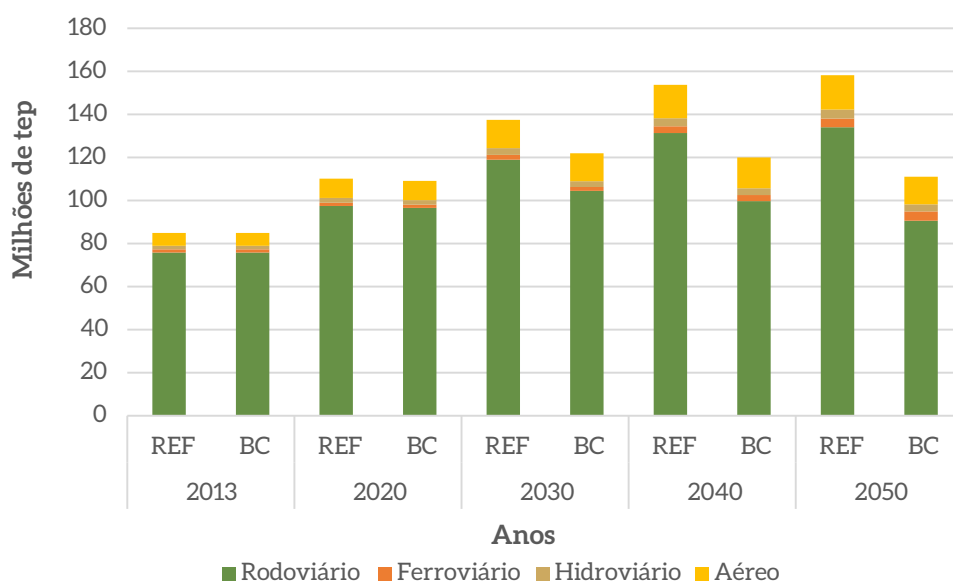


Figura 116 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Modal

Fonte: Elaboração própria

Quanto às emissões de GEE, a Tabela 120 exibe as emissões totais de CO₂, CH₄ e N₂O para o setor no horizonte 2050. Verifica-se que, no cenário BC, o modal rodoviário permanece como principal emissor do transporte, respondendo por 77% da emissão total, em 2050. Todavia, em termos absolutos, as emissões do modal, em 2050, são 40% inferiores em relação ao cenário tendencial. A mudança modal, contudo, gera aumento das emissões dos outros modais, que passam a ter representatividade percentual ligeiramente superior em relação ao cenário REF. Em termos totais, a redução das emissões de GEE no cenário BC atinge 36% em 2050. Nota-se que a redução das emissões totais é mais acentuada do que a redução do consumo energético devido à maior participação dos biocombustíveis.

Tabela 120 – Emissão de Gases de Efeito Estufa por Modal (GgCO₂eq) – Baixo Carbono

Modal	2013	2020	2030	2040	2050
Rodoviário	184.368	208.270	203.028	195.346	184.874
Ferroviário	3.605	3.725	3.219	4.899	7.289
Hidroviário	5.255	6.730	8.258	9.829	10.385
Aéreo	17.631	26.570	38.655	42.483	37.919
Total	210.859	245.294	253.161	252.556	240.468

Fonte: Elaboração própria

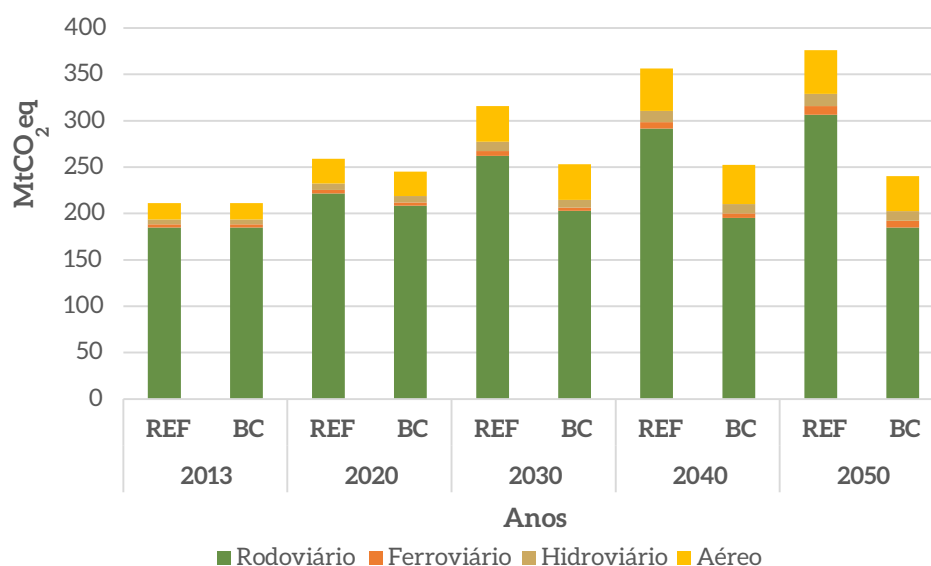


Figura 117 – Emissão de Gases de Efeito Estufa por Modal

Fonte: Elaboração própria

6.5.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

Para o transporte de passageiros, o aumento populacional e da renda *per capita* influencia o crescimento da frota de veículos leves do país. Entretanto, as premissas de alteração modal para o transporte público, em especial para ônibus urbanos, reduzem a quilometragem média percorrida pelos veículos e, conseqüentemente, o nível de congestionamento nas cidades. Esse quadro permite ganhos de desempenho energético adicionais dos veículos.

Apesar do aumento previsto da malha ferroviária de transporte de passageiros, que triplica o efeito atividade ao longo do horizonte analisado, o modal rodoviário permanece como principal representante da atividade do setor, conforme apresentado na Tabela 121. No modal rodoviário, contudo, a participação do transporte individual perde espaço para o transporte coletivo no período estudado.

Tabela 121 – Passageiros-Quilômetro Transportados por Modal (Milhões de PKM) – Baixo Carbono

Modal	2013	2020	2030	2040	2050
Rodoviário	1.681.670	2.307.784	3.030.561	3.512.918	3.849.665
Ferroviário	28.000	31.184	74.774	129.565	167.478
Hidroviário	1.919	2.090	2.277	2.328	2.310
Aéreo	210.861	340.325	562.092	778.367	1.023.317

Fonte: Elaboração própria

Em termos percentuais, o modal rodoviário, em 2050, reduz ligeiramente sua participação na matriz de transporte de passageiros para 76% em 2050 (78% no cenário REF em 2050), como observado na Figura 118. O transporte individual rodoviário, por sua vez, perde participação no setor, passando de 54% em 2013 para 43% em 2050.

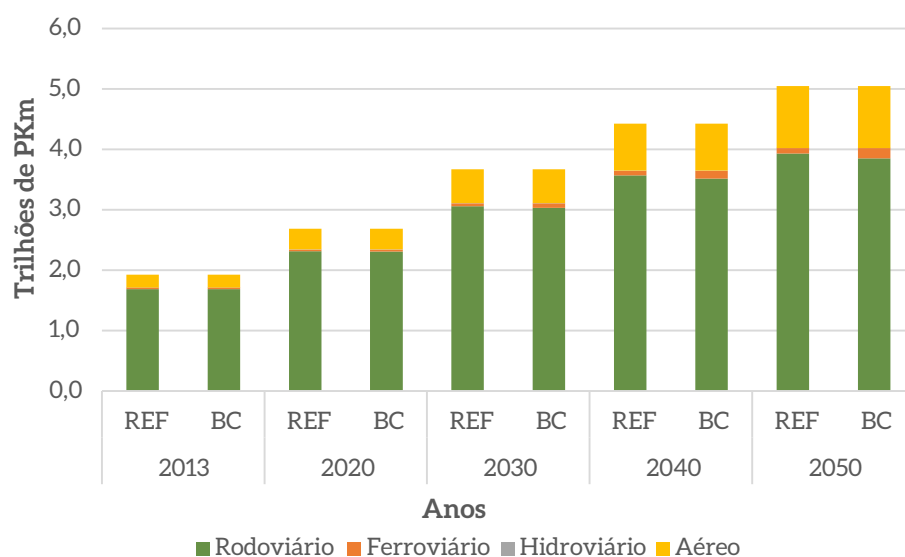


Figura 118 – Distribuição Modal do Transporte de Passageiros

Fonte: Elaboração própria

6.5.2 TRANSPORTE DE CARGA

Com relação ao transporte de carga, o cenário BC deste estudo pressupõe, além da concretização dos investimentos previstos em infraestrutura no setor, a migração do transporte rodoviário de determinados produtos para os modais ferroviário e hidroviário, em especial produtos de maior peso e de grande quantidade transportada no país, como soja em grão, minério de ferro, minerais metálicos não ferrosos e minerais metálicos. A Tabela 122 apresenta o crescimento previsto da atividade do setor, medida em TKU, para os diferentes modais, no período 2013-2050.

Tabela 122 – Tonelada-Quilômetro Transportadas por Modal (Milhões de TKU) – Baixo Carbono

Modal	2013	2020	2030	2040	2050
Rodoviário	815.832	985.904	1.103.915	1.297.898	1.499.321
Ferroviário	316.462	435.805	648.303	984.377	1.494.629
Hidroviário	203.255	282.043	423.864	532.961	578.731
Aéreo	8.635	9.203	8.317	9.573	11.986

Fonte: Elaboração própria

Dessa forma, em termos percentuais, o modal rodoviário reduz sua participação na matriz de transporte de carga no cenário BC, em comparação com o cenário REF, como apresentado na Figura 119, em função da mudança modal considerada de determinados produtos. No horizonte 2050, a participação dos modais na matriz se torna mais equilibrada, atingindo os valores de 42%, 42% e 16%, para os modais rodoviário, ferroviário e hidroviário, respectivamente, enquanto, no cenário REF, esses valores eram de 46%, 40% e 14%, respectivamente.

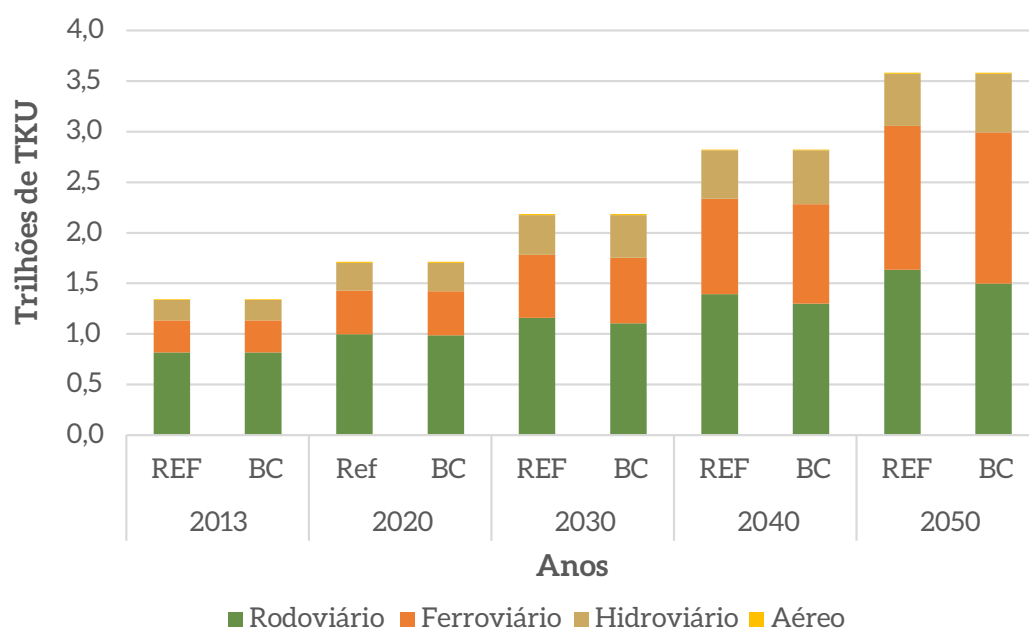


Figura 119 – Distribuição Modal do Transporte de Carga

Fonte: Elaboração própria

6.6 CUSTO MARGINAL DE ABATIMENTO

Nas seções anteriores, foi discutido o potencial técnico para entrada de medidas de baixo carbono no setor de transportes. Nesta subseção, é realizada a discussão da entrada das medidas sob o ponto de vista econômico. Para tal, utiliza-se a ferramenta do custo marginal de abatimento.

6.6.1 ASPECTOS TEÓRICOS

As curvas de custo marginais de abatimento (CMA) de emissão de GEE referem-se a uma representação gráfica da atratividade econômica de opções de baixo carbono em relação ao seu potencial de mitigação.

O custo de abatimento de emissões de GEE, por definição, deve ser avaliado como o custo de seguir uma estratégia de mitigação “incremental” em relação a um cenário de referência (HALSNÆS, 1998). Importante notar que, do ponto de vista de um país, há distinção entre custo total de um projeto e custo incremental. Ambos os conceitos são relevantes num processo decisório. O conceito de custo incremental é relevante para o ponto de vista social, enquanto o custo total de um projeto reflete mais os requisitos financeiros.

Ou seja, o custo marginal de abatimento de emissões de GEE de um projeto é a diferença entre o custo existente no cenário de referência e o custo no cenário com mitigação ou de baixo carbono, expresso monetariamente por unidade de massa de CO₂ equivalente (US\$/tCO₂e), logo, um custo adicional.

Destaca-se que o cálculo da CMA permite identificar os incentivos necessários (preço do carbono) para alcançar a taxa interna de retorno (TIR) dos setores analisados. Ou seja, permite estimar o nível do incentivo que deve ser oferecido aos atores econômicos para que as alternativas de mitigação se tornem atrativas em comparação com as opções consideradas no cenário REF. O propósito é identificar como uma opção de redução dos GEE poderá ser atraente do ponto de vista do setor privado.

Assim, os projetos de mitigação de GEE com taxa de retorno inferior à TIR setorial não são capazes de atrair financiamento privado sem incentivos adicionais, como créditos de carbono. Tais níveis de incentivos são interpretados como um equilíbrio de custos (*break-even*), pois representam o tamanho do incentivo para equiparar os benefícios e custos e atingir a TIR setorial. Se o incentivo, expresso por tonelada de dióxido de carbono evitada (*break-even carbon price*), para uma opção de mitigação de GEE é negativo, a aplicação de tal medida já é economicamente atraente. Por outro lado, se *break-even carbon price* é positivo, a opção não é atraente, porque não pode gerar a TIR setorial necessária sem incentivos no valor do custo de equilíbrio.

Ademais, a CMA permite identificar o potencial de redução das emissões de carbono decorrendo da transição de um cenário REF a um cenário BC. Trata-se do potencial máximo de abatimento de GEE de cada opção considerada em um horizonte predeterminado.

Os custos marginais de abatimento, de acordo com Gouvello (2010), podem ser calculados segundo uma abordagem tecnológica/atividade ou setorial/programa ou ainda macroeconômica. Os custos marginais de abatimento na abordagem tecnológica ou por atividade são os mais simples de serem estimados, porque dependem de técnicas e modelos de análise custo-benefício que requerem menor necessidade de dados e são mais fáceis de interpretar e compreender. Nessa abordagem, cada opção tecnológica de mitigação ou atividade é avaliada separadamente, projeto a projeto, com relação aos custos existentes e às respectivas emissões evitadas de GEE num cenário BC. Assim, o CMA é construído com os resultados de cada uma das opções tecnológicas ou dos segmentos de forma isolada, não captando, portanto, os impactos ou efeitos de uma tecnologia ou atividade sobre outros setores e agentes da economia.

O custo marginal de abatimento leva em conta os investimentos necessários e os custos operacionais (inclusive com os energéticos) (HALSNÆS, 1998). Esse custo, para cada opção de mitigação, está determinado a partir do custo incremental com a implementação da medida em comparação com o cenário REF e das emissões anuais evitadas de acordo com a Equação 25:

$$CMA^{opção} = \frac{CAL^{baixocarbono} - CAL^{base}}{EA^{base} - EA^{baixocarbono}} \quad (Eq. 25)$$

Onde CMA representa o custo marginal de abatimento da tonelada de CO₂ evitada de cada opção de mitigação; CAL representa o custo anual líquido da implantação da opção; EA é a emissão anual em cada cenário.

O custo anual líquido (CAL) (Equação 26) representa a diferença do custo de investimento anualizado e do resultado financeiro anual da implantação da opção. Esse resultado financeiro é dado pela receita total e gastos com operação e manutenção com a implantação da opção.

$$CAL = \frac{INV.r. \frac{(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} + OM + COMB - REC}{(1+r)^{(n-2010)}} \quad (Eq. 26)$$

Onde REC representa a receita; OM o custo de operação e manutenção; COMB os gastos com combustível; INV o custo de investimento; r a taxa de desconto; t a vida útil do projeto; e n o ano de análise.

Nota-se que, ao trabalhar com uma taxa de desconto extremamente reduzida (próxima a zero), tende-se a viabilizar economicamente projetos de baixo carbono enquanto taxas de desconto elevadas tornariam inviável grande parte das opções de investimento de maior tempo de maturação.

6.6.2 POTENCIAIS E CUSTOS MARGINAIS DE ABATIMENTO DO CENÁRIO DE BAIXO CARBONO

A Tabela 123 apresenta os custos marginais de abatimento para o setor de transportes no horizonte 2050. Nesse sentido, no presente estudo, foram consideradas duas taxas de desconto: uma social, no valor de 8% a.a., superior às taxas praticadas na União Europeia, que variam entre 3,55% e 5,5%, e uma de mercado, no valor de 12% a.a., compatível com o contexto econômico nacional, e aplicadas em outros estudos que avaliaram estratégias de baixo carbono para o setor (GOUVELLO, 2010). Verifica-se que as medidas com maior potencial de abatimento incluem os veículos híbridos, veículos a bateria e caminhões pesados mais eficientes e as medidas de mudança modal, tanto de passageiros quanto de carga.

Tabela 123 – Custos Marginais de Abatimento para o Setor de Transportes – Cenário de Baixo Carbono

Medidas ⁴³	Perfil	Tecnologias	Potencial de Abatimento (MtCO ₂)	Custo à Taxa de 8% (US\$/tCO ₂)	Custo à Taxa de 12% (US\$/tCO ₂)
Medidas incrementais	Rodoviário carga	Caminhão semileve mais eficiente	1,90	272,90	133,82
		Caminhão leve mais eficiente	26,62	142,04	69,11
		Caminhão médio mais eficiente	19,55	102,27	48,92
		Caminhão semipesado mais eficiente	119,50	68,94	32,44
		Caminhão pesado mais eficiente	124,10	68,39	32,13
	Rodoviário passageiro	Automóveis a gasolina 30% mais eficientes	11,40	17,07	11,57
		Automóveis flex 30% mais eficientes	110,48	20,74	22,12
		Automóveis híbridos 30% mais eficientes	208,07	441,98	205,53
		Inserção de automóveis plug-in flex	68,80	502,55	181,13
		Inserção de automóveis a bateria	105,27	296,13	106,90
		Comerciais leves a gasolina 30% mais eficientes	17,05	11,84	7,93
		Comerciais leves flex 30% mais eficientes	42,27	3,55	5,70
		Comerciais leves a diesel 30% mais eficientes	46,36	22,19	11,00
		Motocicletas a gasolina 15% mais eficientes	11,05	52,41	26,39
		Motocicletas flex 15% mais eficientes	5,72	106,88	51,83
		Ônibus urbano 30% mais eficiente	91,46	-36,68	-14,12
		Micro-ônibus 30% mais eficientes	15,84	-31,06	-11,73
		Ônibus rodoviários 30% mais eficientes	15,25	-36,82	-13,98
	Ferroviário carga	Trens mais eficientes: redução do arrasto, carga compacta, maquinário mais eficiente e condução ecoconsciente	52,64	38,33	21,39

⁴³ Os custos marginais de abatimento para as medidas relacionadas aos biocombustíveis não foram considerados, tendo em vista que suas políticas de estímulo estão vinculadas com medidas mandatórias ou de incentivo à pesquisa e desenvolvimento, cujos impactos econômicos são de difícil mensuração.

Medidas ⁴³	Perfil	Tecnologias	Potencial de Abatimento (MtCO ₂)	Custo à Taxa de 8% (US\$/tCO ₂)	Custo à Taxa de 12% (US\$/tCO ₂)
Medidas incrementais	Hidroviário carga	Embarcações mais eficientes: planejamento da rota com previsão climática; redução das resistências hidro e aerodinâmica; renovação de embarcações	59,64	16,52	10,88
	Hidroviário Carga e passageiro	Embarcações mais eficientes: limpeza do casco e hélice; piloto automático; tecnologia de combustão common rail; sistema de geração de energia solar fotovoltaica	14,76	39,82	26,30
	Aéreo carga e passageiro	Aeronaves mais leves e com motores mais eficientes	78,37	1,54	0,85
Mobilidade urbana	Rodoviário passageiro Ferroviário passageiro	Priorização de modais não motorizados sobre motorizados; expansão de faixas exclusivas de ônibus (BRT); investimentos na ampliação e em melhorias de sistemas sobre trilhos de alta e média capacidade; implantação de TAV e trens regionais	664,85	0,07	0,02
Infraestrutura para transporte de carga	Rodoviário carga Ferroviário carga	Diversificação da matriz de transporte de carga	141,29	126,28	59,58

Fonte: Elaboração própria

Os custos à taxa de desconto de 12% ao ano têm como base os custos privados, os quais refletem a perspectiva dos consumidores e empresas privadas. Os custos à taxa de 8%, por sua vez, levam em conta custos e benefícios sociais, os quais refletem o ponto de vista da sociedade, isto é, supõe-se que a eficiência do mercado melhore por meio de políticas e medidas a fim de superar possíveis barreiras.

Contudo, cumpre observar que parte das medidas discriminadas na Tabela 123 apresenta custos sociais (taxa de 8%) superiores aos custos privados (taxa de 12%), o que se deve ao fato de essas medidas terem a característica de introdução gradual e crescente de novas tecnologias, de modo que quanto maior a taxa de desconto, menor será o valor presente líquido dos investimentos ao final do período de análise. Portanto, nesses casos, alcançar o máximo potencial de abatimento se torna menos oneroso se realizado pela perspectiva de mercado, a qual exige menor grau de incerteza quanto a investimentos futuros.

A Figura 120 exibe a curva de custo marginal de abatimento para o setor (taxas de 8% e 12% ao ano), em que se verifica que o potencial total de abatimento é da ordem de 2,05 GtCO₂, no horizonte 2050, a um custo total de R\$ 202 bilhões, para taxa de 8%, e R\$ 90 bilhões, para taxa de 12%.

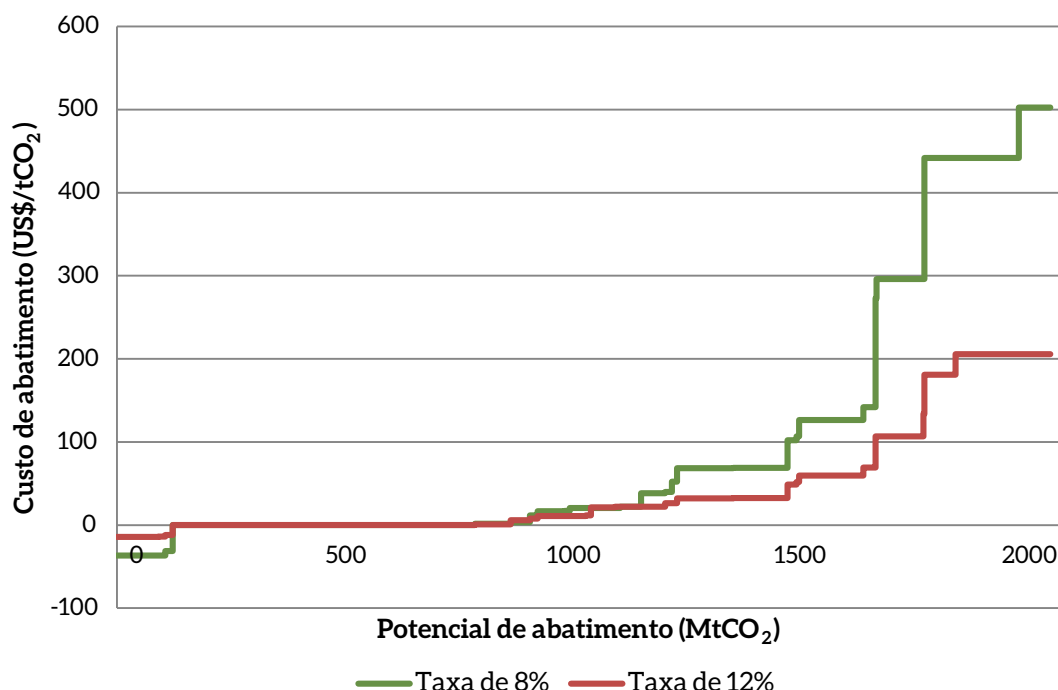
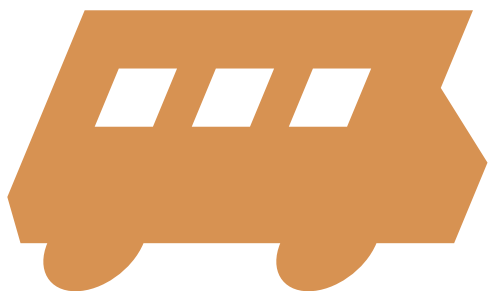


Figura 120 – Curva de Custo Marginal de Abatimento – 2050

Fonte: Elaboração própria

As medidas que demandam menores esforços para implementação são as focadas em melhorias incrementais em ônibus, tornando-os 30% mais eficientes, as quais apresentam custo marginal negativo e representam cerca de 10% do potencial total de abatimento. Cerca de 56% das medidas analisadas apresentam custos marginais de abatimento abaixo de US\$ 50 por tonelada de CO₂, para taxa de 8%, e juntas apresentam potencial de abatimento acumulado de 1,2 GtCO₂. Quanto a medidas de mudança modal, destacam-se as relacionadas à mobilidade urbana cujo custo total de implementação é de cerca de US\$ 45 milhões, à taxa social.

A curva de custos marginais de abatimento é reportada neste relatório para fins de avaliar, comparativamente, a diferenciação dos potenciais e custos com relação aos resultados da modelagem integrada dos cenários do sistema energético, no qual se insere o setor de transportes. Será possível verificar no relatório de cenário integrados a principal limitação dessa metodologia, qual seja, superestimar e subestimar, respectivamente, potenciais e custos de abatimento em virtude da desconsideração dos efeitos das atividades setoriais de mitigação de emissões de GEE em outros setores da economia.



Cenário de baixo carbono com inovação

Capítulo

7

7 CENÁRIO DE BAIXO CARBONO COM INOVAÇÃO

Neste capítulo, é apresentado o cenário de baixo carbono com inovação (BC+I) para a projeção do consumo energético, efeito atividade e emissões de GEE do setor de transporte, no horizonte 2050. O cenário BC+I apresenta as características básicas do cenário BC, discutidas no capítulo 6, considerando tecnologias que não estão disponíveis comercialmente, portanto, com barreiras técnico-econômicas para a implementação em larga escala no setor.

Nesse cenário, são mantidas as trajetórias das principais variáveis-chave do modelo, no horizonte de análise, em relação ao cenário BC. A diferenciação se dá com a introdução das seis tecnologias inovadoras para o setor de transportes que não foram consideradas no cenário BC. O foco das tecnologias de célula a combustível, ônibus a etanol e trens de levitação magnética é no transporte de passageiros, enquanto aviões solares, caminhões híbridos e embarcações com *towing kite* têm como foco o transporte de carga. Assim sendo, o cenário representa a inclusão de tecnologias de ruptura que trazem efeitos adicionais de potencial de abatimento de emissões de GEE em relação ao cenário BC.

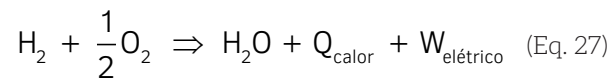
Para esse cenário, são mantidas as premissas de crescimento macroeconômicas apresentadas no capítulo 5. De forma semelhante aos cenários anteriores, as premissas e hipóteses de trabalho adotadas neste estudo serão apresentadas separadamente por modal. Todavia, uma vez que as premissas macroeconômicas, o efeito atividade de cada modal e a taxa de ocupação veicular não são alteradas nesse cenário em relação ao cenário BC, estas não serão mencionadas neste capítulo.

Diante disso, na subseção 7.1, serão caracterizadas as tecnologias inovadoras consideradas para o setor. Nas subseções 7.2 a 7.5, serão descritas as premissas e estimativas consideradas com a entrada das novas tecnologias relacionadas aos diferentes modais, com o intuito de fornecer as bases de projeção para o consumo de energia e emissões de GEE do setor de transportes no horizonte 2050, a ser apresentada na subseção 7.6.

7.1 TECNOLOGIAS INOVADORAS NO SETOR DE TRANSPORTES

7.1.1 VEÍCULOS A CÉLULA A COMBUSTÍVEL

Célula a combustível, conforme discutido na seção 3.2.1.2, é um dispositivo conversor eletroquímico que converte energia química diretamente em energia elétrica, apresentando maior flexibilidade em comparação ao processo convencional de combustão em máquinas térmicas, cuja conversão de energia se dá em vários estágios: da química para a térmica, da térmica para a mecânica e, finalmente, a mecânica gerando a elétrica (SHARAF; ORHAN, 2014). Os componentes básicos das células a combustível são dois eletrodos (positivo e negativo) e um eletrólito intermediário capaz de transferir íons positivos nas duas direções, enquanto o fluxo de elétrons correspondente no circuito externo demanda energia ou usa energia para gerar combustível (SØRENSEN, 2005). A reação produz água, calor e eletricidade, conforme a Equação 27:



Isto é, para a produção de energia elétrica na célula a combustível, o gás hidrogênio é direcionado ao eletrodo negativo (anodo), onde perde elétrons e forma íons H^+ capazes de atravessar o eletrólito enquanto os elétrons passam pelo circuito externo. O gás oxigênio, de forma similar, é direcionado ao eletrodo positivo (catodo), onde há uma reação mais complexa que libera água (SØRENSEN, 2005). Nesse processo, o calor e a água devem ser continuamente removidos de modo a garantir uma operação isotérmica ideal para a geração elétrica.

Compatíveis com as fontes renováveis e com os novos vetores energéticos, como o hidrogênio, as células a combustível são consideradas como o mecanismo limpo e mais eficiente na conversão de energia para o desenvolvimento sustentável e segurança energética. Conforme a Figura 121, as células a combustível ocupam lugar de destaque dentre os conversores de energia tradicionais, apresentando maior exergia⁴⁴ do que motores diesel, motores Otto, turbinas a gás, motores ciclo Rankine, bem como motores ciclo combinado.

⁴⁴ Exergia é o trabalho máximo que pode ser obtido por meio do processo mais adequado de um sistema que se encontre em estado inicial até que atinja o estado final, caracterizado pelo equilíbrio termodinâmico com o ambiente.

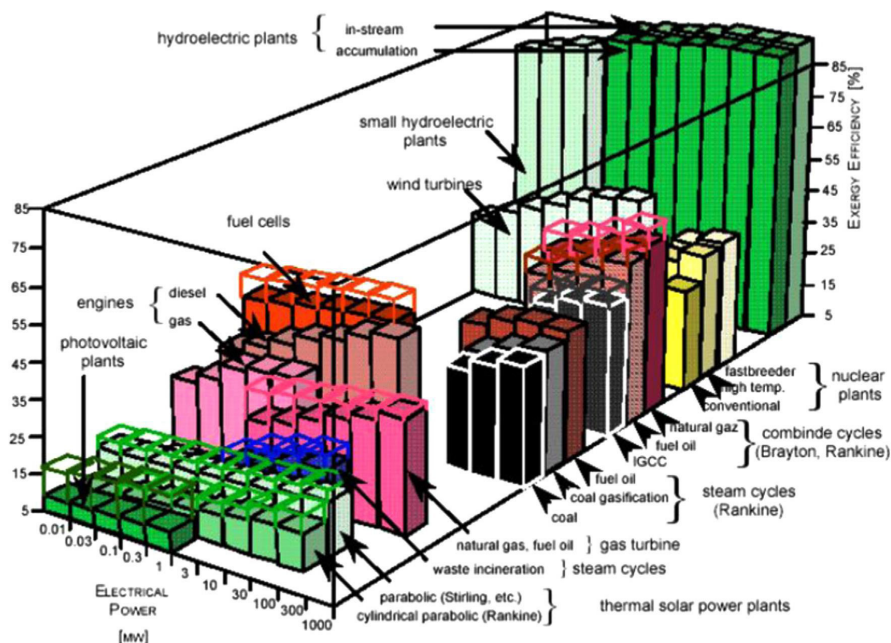


Figura 121 – Eficiência Exergética dos Principais Conversores de Energia

Fonte: VON SPAKOVSKY; OLSOMMER, 2002

A natureza estática da célula a combustível também implica uma operação silenciosa, sem ruído ou vibração, enquanto sua modularidade inerente permite diversa gama de aplicações em geração de energia portátil, estacionária e de transporte. Contudo, ainda há barreiras a ultrapassar, como altos custos e desenvolvimento de mecanismos de armazenamento de hidrogênio. As principais vantagens e desvantagens da tecnologia podem ser visualizadas no Quadro 14.

Quadro 14 – Principais Vantagens e Desvantagens das Células a Combustível

Vantagens	Desvantagens
Redução de emissões	Altos custos
Alta eficiência	Baixa durabilidade
Modularidade e ganhos de escala	Infraestrutura imatura do hidrogênio
Excelente resposta de carga	Balanço de água
Natureza estática	Carga parasítica
Gama de aplicações e flexibilidade	Códigos e padrões de segurança

Fonte: SHARAF; ORHAN, 2014

Os veículos a célula a combustível (VCC), além de elevada eficiência de conversão, da ordem de 60% (POLLET; STAFFELL; SHANG, 2012), apresentam menor tempo de abastecimento quando comparados com os veículos elétricos a bateria. Os VCC têm como componentes básicos a célula a combustível, sistema de armazenamento para o hidrogênio, radiador para a célula, unidade de controle de potência e motor elétrico, assim como os veículos a bateria (SHARAF; ORHAN, 2014).

Todavia, as duas principais limitações dessa tecnologia para comercialização em larga escala são os elevados custos de aquisição do veículo e, principalmente, os aspectos relacionados a produção, transporte e armazenamento do hidrogênio. Ou seja, tendo em vista que o hidrogênio é um vetor energético, há a necessidade de produção do combustível para o uso nas células a combustível. Esse processo de conversão pode ser feito basicamente de duas formas: *off-board* e *on-board*. No primeiro caso, o hidrogênio requerido para alimentar a célula a combustível é produzido fora do veículo e transportado para postos de distribuição. Em seguida, é realizado o armazenamento do hidrogênio dentro do veículo (SHARAF; ORHAN, 2014). Como atualmente a infraestrutura para realização desse procedimento é cara (AHLUWALIA; HUA; PENG, 2012) e o acesso comercial ao hidrogênio é limitado, existe a discussão sobre a produção de hidrogênio no veículo (*on-board*). Nesse caso, são utilizados combustíveis convencionais com hidrogênio em sua composição mais acessíveis comercialmente, como etanol ou metanol, e a produção do hidrogênio é feita internamente no veículo (BOWERS et al., 2007).

Independentemente da forma de produção do hidrogênio, um dos grandes desafios do veículo a célula a combustível está relacionado com o armazenamento, que pode ser feito por meio de hidrogênio comprimido, hidrogênio líquido, metal hidreto, entre outros (AHLUWALIA; HUA; PENG, 2012). O hidrogênio comprimido armazena hidrogênio em um tanque em alta pressão e tem como vantagem usar diretamente o hidrogênio sem necessidade de processamento. Porém, o volume necessário para uma autonomia adequada torna-se muito elevado. O hidrogênio líquido, por sua vez, tem como vantagem a necessidade de um volume menor de armazenamento. Entretanto, apresenta eficiência muito baixa e perda de hidrogênio quando o veículo se mantém parado por longo tempo. Os metais hidretos têm como principal vantagem usar combustíveis mais acessíveis que o hidrogênio, mas são termicamente instáveis e, em sua fase térmica estável, seu nível de energia é muito baixo, o que torna seu uso inviável.

Em média, os VCC apresentam autonomia de 400 km, com velocidade máxima de 160 km/h e desempenho energético de 28 km/litro de hidrogênio. Entretanto, ainda existem muitas barreiras para a implementação em larga escala dos VCC, como custo e durabilidade (SHARAF; ORHAN, 2014). Outro aspecto que deve ser levado em consideração para viabilizar esse tipo de tecnologia é a infraestrutura para abastecimento.

Mundialmente, a produção dos VCC é baixa e, atualmente, restringe-se aos veículos experimentais (protótipos). A Hyundai já anunciou sua primeira linha de produção em massa e espera-se que seja capaz de produzir o veículo ao custo de US\$ 50.000 por unidade (FUEL CELLS BULLETIN, 2013), preço 43% superior ao modelo equivalente à combustão interna (ICARROS, 2014). Esse valor é semelhante ao preço do VCC da Toyota, que tem previsão de lançamento também em 2016 (BLOOMBERG, 2010). No horizonte 2030, a expectativa é que o valor do veículo seja reduzido para US\$ 23.000 (VEZIROGLU; MACARIO, 2011). Mais discussões a respeito de veículos experimentais de célula a combustível produzidos atualmente foram apresentadas na 3.2.1.2.

7.1.2 ÔNIBUS A ETANOL

O interesse por combustíveis renováveis, em substituição aos fósseis, coloca o etanol e o Brasil no centro da discussão mundial acerca das mudanças climáticas. O país domina a tecnologia de produção para utilização em larga escala, dada a disponibilidade de terras para expansão das lavouras de cana-de-açúcar, demanda externa aquecida e entrada de importantes grupos empresariais no setor. Além de veículos leves, como automóveis e motocicletas, ônibus movidos a etanol são comercializados na Europa e apresentam bom funcionamento (BEST, 2011). Assim, o etanol usado como combustível para a frota de ônibus urbanos nacional pode contribuir para significativas reduções nas emissões de GEE no transporte público das metrópoles.

Os motores ciclo diesel, também conhecidos como motores de ignição por compressão, são entendidos como máquinas térmicas que transformam a energia proveniente de uma reação química em energia mecânica. O processo de conversão se dá em processos termodinâmicos que envolvem admissão (*intake stroke*), compressão (*compression stroke*), expansão (*power stroke*) e exaustão (*exhaust stroke*), conforme a Figura 122.

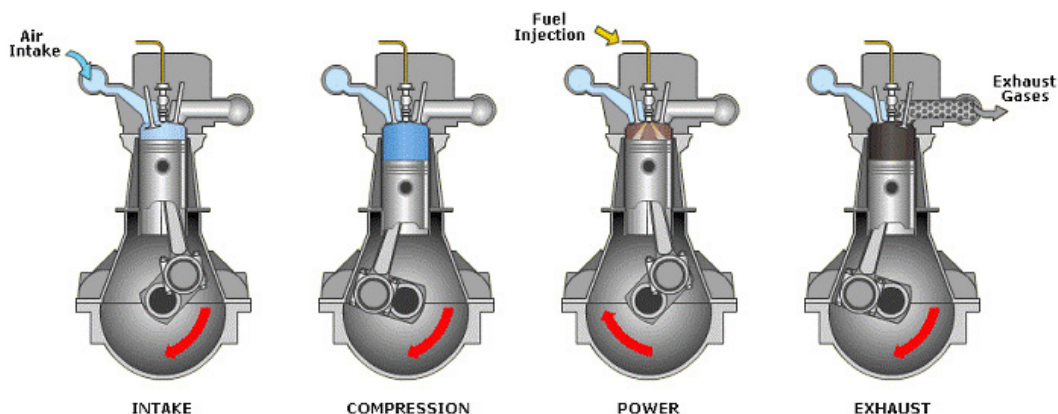


Figura 122 – Ciclos do Motor de Ignição por Compressão de 4 Tempos

Fonte: RAIL MOTOR SOCIETY, 2015

Nas décadas passadas, os motores misturavam o combustível óleo diesel e o ar em uma câmara de pré-combustão antes da própria injeção no interior do cilindro. Esses passos de mistura e injeção eram controlados mecanicamente, o que tornava difícil a obtenção da correta mistura ar-combustível. Como resultado, o combustível era desperdiçado e as emissões, por meio dos gases de escape, eram relativamente altas. Nos dias atuais, o óleo diesel é injetado diretamente nos cilindros do motor, perto do final da compressão do ar, com o auxílio de processadores. A finalidade é entregar precisamente a quantidade correta de combustível no instante necessário. Nos motores atuais, todas as funções são controladas por um módulo de controle eletrônico que faz interface com uma gama de sensores localizados estrategicamente por todo o motor. A presença do controle eletrônico é justificada por uma queima de combustível mais completa, oferecendo maior potência e maior economia de combustível (FERRARI FILHO, 2011). A inflamação do combustível se faz pelo aumento da temperatura provocada pela compressão da mistura inflamável. A taxa de compressão é alta, variando entre 14:1 a 22:1. Na câmara de combustão, o ar está comprimido e o óleo é injetado no momento de máxima compressão, de modo que, com a alta temperatura, o óleo é inflamado, sem a necessidade de velas de ignição.

Nos motores ciclo diesel alimentados com etanol (Figura 123), há necessidade de adaptações para se obter um bom funcionamento. De acordo com Westman (2010), as principais diferenças são: a utilização de diferentes pistões a fim de alcançar maior taxa de compressão (próxima de 28:1); um sistema de injeção de combustível com maior vazão e uma bomba de combustível com maior capacidade de fluxo; modificações no *timing* de injeção, dada a necessidade de maiores injetores de combustíveis; e a utilização de vedação e filtros de materiais resistentes ao álcool. Cabe destacar considerações locais na concepção do veículo, dado que um motor projetado para climas frios deve também apresentar um aquecedor de combustível localizado entre o tanque e o motor, de modo a garantir melhor desempenho (BEST, 2009).



Figura 123 – Modelo de Motor de Ignição por Compressão Movido a Etanol

Fonte: WESTMAN, 2010

Os motores a etanol da Scania estão na terceira geração, desde o início da sua produção no final dos anos 1980. No Brasil, o modelo disponível apresenta as especificações da Tabela 124.

Tabela 124 – Modelo de Motor Ciclo Diesel Movido a Etanol Scania Nacional

Motor	270 hp DC9 E02 270
Combustível	Etanol
Volume	8,9 litros
Sequência de ignição	1-2-4-5-3
Cilindros	5 em linha
Cabeçotes de cilindro	5
Válvulas por cilindro	4
Diâmetro x curso	127x140 mm
Taxa de compressão	28:1
Controle de injeção de combustível	Scania PDE
Controle de emissões	Proconve P7
Potência máxima	198 kW (270 hp)
Torque máximo	1.200 Nm
Frenagem máxima do motor	170 kW

Fonte: GALLO, 2012

Essas adaptações se devem às diferenças das propriedades físico-químicas dos combustíveis. O óleo diesel é um combustível fóssil, derivado do petróleo, formado basicamente por hidrocarbonetos, mas apresenta também em sua composição oxigênio, nitrogênio e enxofre. O mais empregado é o óleo diesel leve, dodecano, porém há outras composições:

- Óleo diesel leve: $C_{12}H_{26}$ (dodecano);
- Óleo diesel médio: $C_{13}H_{28}$ (tridecano);
- Óleo diesel pesado: $C_{14}H_{30}$ (tetradecano).

O número de cetano (NC) é uma das principais propriedades do combustível para motores de ignição por compressão por se tratar de uma característica físico-química relacionada ao intervalo de tempo entre a injeção do combustível e sua ignição quando submetido às condições de temperatura e pressão que se estabelecem na câmara de combustão. Trata-se, portanto, de uma medida de qualidade do combustível, a qual deve variar entre 40 e 60 para o óleo diesel. O NC elevado favorece rápido aquecimento do motor, redução da possibilidade de danificações nos pistões, baixo nível de ruído no motor, como também baixo índice de emissões de poluentes. Para NC abaixo de 40, há perda de potência, maior consumo de combustível e fumaça na descarga (EGÚSQUIZA, 2006).

Seu possível substituto, o etanol é um derivado da cana-de-açúcar, do milho, entre outras biomassas, e sua produção se dá, essencialmente, por meio da fermentação da sacarose. Sua composição, C_2H_5OH , por apresentar uma quantidade menor de carbono em relação ao óleo diesel, emite uma quantidade consideravelmente menor de material particulado (EGÚSQUIZA, 2011). Contudo, o etanol tem número de cetano entre 5 e 15, o que justifica adaptações em motores ciclo diesel tradicionais a fim de evitar atrasos significativos na ignição. Uma taxa de compressão de 28:1 para alimentação com etanol corresponde a taxa de compressão de 18:1 para óleo diesel (WESTMAN, 2010). Outro ponto importante é que o poder calorífico do etanol é menor do que o do diesel por se tratar de um fluido higroscópico, ou seja, absorve água com facilidade, havendo necessidade de maior volume de etanol para suprir a mesma quantidade de energia equivalente à de diesel. As principais diferenças das propriedades físico-químicas dos combustíveis podem ser visualizadas na Tabela 125.

Tabela 125 – Propriedades Físico-Químicas dos Combustíveis (1 atm e 288 K)

Propriedades	Óleo Diesel	Etanol
Fórmula química principal	$C_{12}H_{26}$	C_2H_5OH
Relação atômica H/C do combustível	1,85	3
Massa molecular [g/mol]	170	46
Massa específica [kg/m ³], 20°C e 1 atm	830	790
Razão ar/combustível estequiométrica [kg/kg]	15,14 / 1	9,07 / 1
Temperatura de autoignição [°C]	254	420
Poder calorífico superior [kJ/kg]	45.590	29.726
Poder calorífico inferior [kJ/kg]	42.450	26.865
Limite de inflamabilidade no ar [% por volume]	0,5-0,7	4,3-19
Número de octana	–	108
Número de cetano	44-50	–
Calor latente de vaporização (kJ/kg)	–	903
Calor de combustão de 0,028m ³ de mistura estequiométrica a 1 atm e 15,6°C [kcal/kg]	49,17	52,61
Viscosidade a 300 K [cSt]	3,71	1,78

Fonte: FERRARI FILHO, 2011

Com vistas à melhoria dessas propriedades, a alimentação de motores ciclo diesel exclusivamente com etanol exige o uso de aditivos, como redutores de octanagem, recuperadores de lubricidade e aumentadores de número de cetanos. Além disso, devem ser adicionados redutores de corrosão para inibir a ação do etano sobre os componentes formados a partir de materiais metálicos e elastômeros com os quais ele entra em contato. Apesar de o uso exclusivo do etanol reduzir drasticamente a produção de poluentes na forma de material particulado, cabe ressaltar que pode ocorrer aumento na produção de aldeídos (EGÚSQUIZA, 2011).

Até o ano de 2010, cerca de 900 ônibus movidos a etanol estavam em circulação, principalmente em Estocolmo (Suécia), mas também em outras cidades do mundo, como La Spezia (Itália), Madri (Espanha), Rotterdam (Holanda), Nanyang (China) e São Paulo (Brasil) (BEST, 2010). Em Estocolmo, aproximadamente 6,7 milhões de viagens são realizadas dentro da cidade todos os dias, sendo 60% por transporte público e 25% por veículos privados. A qualidade do ar nos distritos da cidade é um importante problema relacionado com o tráfego e com o meio ambiente, de modo que a autoridade de transporte público (Stockholm Public Transport Authority) tem sob seu comando cerca de 100% da frota de ônibus movidos a combustíveis renováveis, 65% deles movidos a etanol (Figura 124). No Brasil, em 2009, havia apenas um ônibus movido a etanol em circulação entre os distritos de Diadema, São Bernardo do Campo, Santo André e São Paulo, no estado de São Paulo (BEST, 2009).



Figura 124 – Ônibus Urbano Movido a Etanol em Estocolmo (Suécia)

Fonte: JOHANSSON, 2006

De acordo com Best (2010), a vasta experiência de operar ônibus movidos a etanol em Estocolmo (Suécia) mostra que estes requerem manutenção a cada 10 mil km em comparação aos 20 mil km dos ônibus a diesel. Essa manutenção adicional, principalmente para mudança do filtro e do óleo do motor, além do uso de aditivos, representa aumento no custo de operação. Atualmente, um ônibus movido a etanol custa cerca de 10% a mais que um ônibus a diesel tradicional (WESTMAN, 2010).

Assim, uma das principais barreiras para a implementação dos ônibus a etanol no Brasil, em larga escala, está relacionada aos custos envolvidos da tecnologia, que requer aprendizado tecnológico para sua adoção. Mais que isso, a existência de apenas um fabricante dos motores modificados (Scania) e de uma única empresa fabricante do aditivo utilizado no ônibus (Sekab) no Brasil justifica a consideração desses veículos no cenário BC+I.

7.1.3 EMBARCAÇÕES COM *TOWING KITE*

Para o transporte hidroviário, parte significativa das ações consideradas avançadas tecnologicamente utiliza energia renovável. Como solução de maior ganho de eficiência energética dentre essas oportunidades, está o equipamento *towing kite*, que, basicamente, utiliza uma pipa instalada na proa da embarcação para reduzir a potência exigida pelo motor da embarcação.

A força de sustentação é a responsável pelo voo dos aviões, pela propulsão gerada por uma vela em um barco, bem como pelos *kites* ou pipas. Todos esses dispositivos trabalham como aerofólios, isto é, corpos aerodinâmicos destinados a prover maior força de sustentação com um mínimo de força de arrasto, e obedecem, essencialmente, o mesmo princípio de funcionamento, conforme o Teorema de Bernoulli apresentado na Equação 28:

$$p_{\infty} + \frac{1}{2}\rho V^2 = \text{constante} \quad (\text{Eq. 28})$$

Onde p_{∞} é a pressão de ar no sistema, ρ é a densidade do fluido (ar, no caso) e V é a sua velocidade.

No equipamento *towing kite*, a pipa tem aparência semelhante aos kites usados como parapente e *kitesurfing*, formada por duas camadas de tecido conectados por frisos, definindo sua forma aerodinâmica e permitindo sua expansão com a entrada de ar no bordo de ataque. Um conjunto de linhas compõe a estrutura de conexão do tecido da pipa (*canopy*) ao nó central (*control pod*) que transmite a força do sistema por um cabo até o controle de propulsão (*launch and retrieval system*), conforme Figura 125.

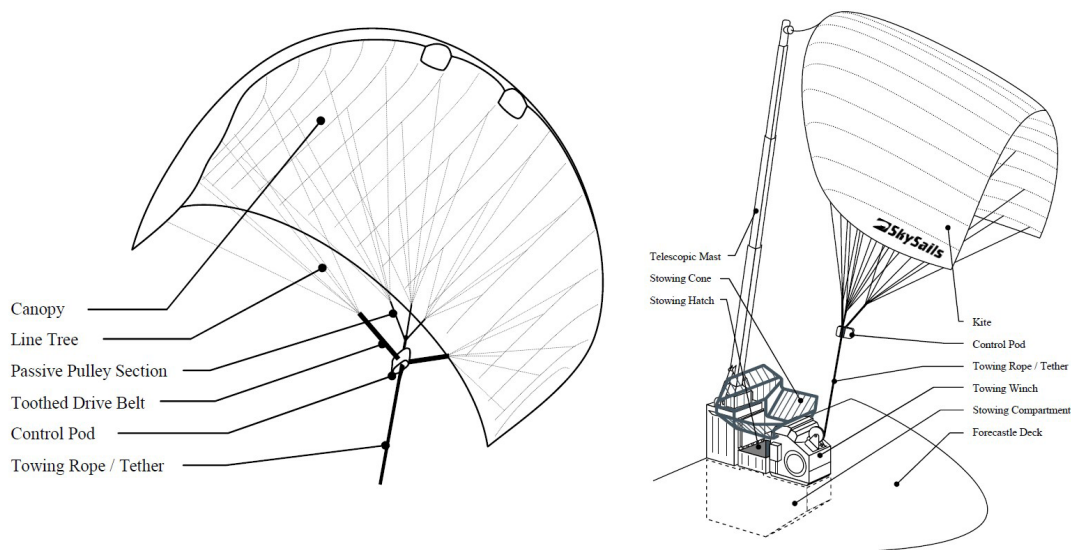


Figura 125 – Componentes do Sistema de *Towing Kite*

Fonte: FRITZ, 2013

O sistema de controle tem como objetivo lançar a pipa do convés, com a tração ideal para aproveitar o máximo de energia possível oriunda dos ventos, bem como recolhê-la com segurança ao final do seu uso. Para o lançamento, um mastro retrátil é erguido, de modo que a pipa saia do compartimento numa posição que permita a ação do vento de inflá-la e tensionar o conjunto de linhas. Atingida tensão suficiente no cabo principal, inicia-se a ascensão à altitude operacional, na qual a pipa realizará seus padrões de voos dinâmicos, conforme Figura 126.

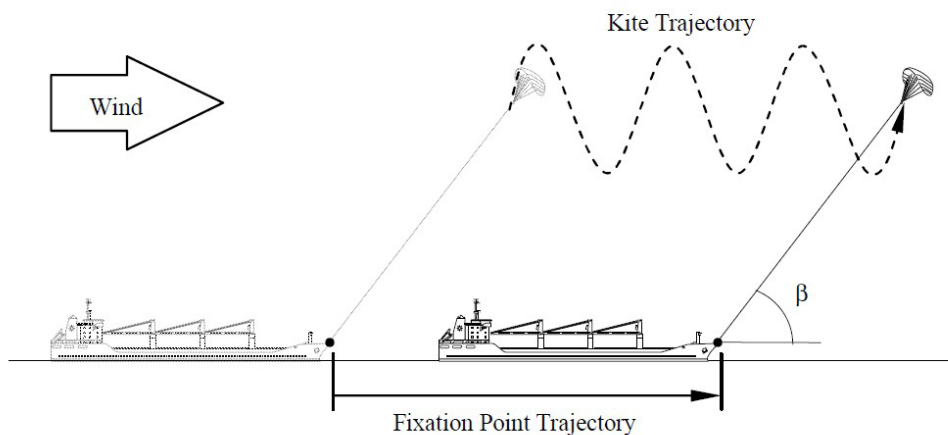


Figura 126 – Trajetória Dinâmica da Pipa para Propulsão

Fonte: FRITZ, 2013

Normalmente, um computador instalado na cabine de comando conduz automaticamente toda a operação e serve de interface para que o comandante analise os dados e possa tomar o controle manual em caso de emergência. O sistema de controle está em comunicação com outros sensores do navio, como posição do leme, anemômetros, GPS, bem como sensores que medem o consumo do navio com o uso do *towing kite*. A trajetória dinâmica da pipa, portanto, depende da velocidade do vento e do ângulo de incidência, de modo que se atinjam forças mais elevadas quando se posiciona no centro da janela de vento, isto é, maximiza-se a força útil desde que a pipa tenha espaço suficiente para manobrar e mantenha uma distância mínima requerida da superfície do mar. Como apresenta o formato de um aerofólio, a pipa gera força de sustentação, podendo permanecer estática ou realizar trajetórias de voo que aumentam a velocidade do fluxo de ar. Dessa forma, o sistema de controle possibilita o melhor aproveitamento do vento tanto da direção quanto da velocidade (ERHARD; STRAUCH, 2013; FABER et al., 2010).

Outras importantes vantagens técnicas do *towing kite* são: maior força propulsiva por metro quadrado do que uma vela tradicional, pelo fato de poder alcançar altitudes de 100 a 300 metros, onde os ventos são mais fortes e estáveis; as forças de tração são transmitidas para o nível do convés do navio, mais precisamente na proa, de modo que a inclinação do navio é reduzida em comparação com uma vela tradicional (SKYSAILS, 2011).

Cabe ressaltar que o equipamento *towing kite* não pode ser operado em cursos contra o vento. No entanto, dado o *design* da pipa, diferentemente de uma vela tradicional, pode ser utilizado em cursos de até 50° do vetor de vento. Testes práticos indicaram que, a partir de 70°, elevada propulsão pode ser alcançada, mas os cursos mais eficientes se encontram entre 120° e 140°. Outra desvantagem é que o sistema não pode ser operado com ventos fracos (abaixo de 3 Beaufort),⁴⁵ bem como não se deve utilizar a tecnologia em áreas de denso tráfego de navios por questões de segurança (SKYSAILS, 2011).

45 Escala de intensidade de vento cujo grau 3 representa uma brisa fraca, de no máximo 20 km/h. O sistema opera no intervalo de 3 a 8 Beaufort, predominantemente.

A possibilidade de empregar pipas para navios comerciais é estudada desde os anos 1980, após as crises do petróleo mostrarem a dependência da economia mundial desse recurso natural. Impulsionada pelo movimento de subida dos preços do petróleo nos anos 2000, a empresa SkySails, fundada em 2001, em Hamburgo (Alemanha), se estabeleceu no mercado cumprindo as necessidades do transporte hidroviário de carga a partir da tecnologia *towing kite*. A SkySails é a única empresa do mundo a desenvolver a tecnologia para aplicação industrial, sendo que mais de 150 pipas já foram comercializadas. Assim, a tecnologia, apesar de disponível comercialmente, apresenta barreiras para utilização em larga escala, como reduzido número de fabricantes e localização na curva de aprendizado da tecnologia, que a tornam economicamente inviável na atualidade.

Por fim, deve-se destacar que, para embarcações comercialmente disponíveis, podem-se alcançar reduções entre 3,5% e 20,2% do consumo de combustível (Tabela 126),⁴⁶ e os custos de investimento do sistema *towing kite* estão demonstrados na Tabela 60.

Tabela 126 – Custos do Sistema *Towing Kite*

Tamanho da pipa (m ²)	Potência equivalente do motor (kW)	Custo (mil US\$)
320	1.200	480
640	2.500	920
1280	4.900	1.755
2500	9.600	2.590
5000	19.200	3.430

Fonte: FABER et al., 2010

7.1.4 VEÍCULO HÍBRIDO HIDRÁULICO

Um veículo híbrido hidráulico – *hydraulic hybrid vehicles* (HHV) – funciona a partir de duas forças motrizes: um motor de combustão interna comum e um sistema de motor hidráulico. O sistema híbrido hidráulico tem dois grandes componentes: o acumulador pneumático-hidráulico, que consiste em um vaso que armazena o fluido pressurizado, e bombas ou motores de acionamento hidráulico. O fluido é utilizado pelo acionamento hidráulico para girar as rodas do veículo, permitindo o uso da frenagem regenerativa: a unidade hidráulica é usada para repressurizar o fluido usando a dinâmica do veículo e convertendo a energia cinética em energia potencial reutilizável (USA/EPA, 2015). Essa tecnologia decorre de anos de uso do sistema hidráulico e energia gerada por fluidos em determinados setores e subsetores como indústria, agricultura, mineração, construção e indústria aeronáutica (KUTZ, 2008).

O sistema híbrido hidráulico apresenta a grande vantagem de poder ser aplicado em veículos que demandam muita energia, como caminhões, SUV e ônibus, consistindo na melhor alternativa híbrida para os veículos pesados na economia do consumo de combustível. É de interesse de grandes companhias, como Ford e General Motors, que essa tecnologia seja implementada na categoria de veículos pesados. Para SUV e ônibus, já existem protótipos de modelos (KUTZ, 2008). Além disso, a tecnologia tem sido aplicada em veículos militares, caminhões de coleta de lixo e bicicletas, porém a presente seção tratará apenas de veículos pesados.

46 Deve-se ressaltar a dificuldade de determinar o potencial de redução de consumo de combustível, uma vez que isso não depende apenas da área da pipa, mas também do percurso do navio e suas respectivas condições climáticas. Para mais informações sobre as condições padrões para estimação, consultar FABER et al., 2010.

Testes realizados pela United States Environmental Protection Agency (EPA), em conjunto com o National Vehicle & Fuel Emissions Laboratory, apresentaram redução de 34% em uma SUV 4x4 (KUTZ, 2008). A EPA também foi responsável por desenvolver um caminhão do tipo UPS, veículo utilizado nos Estados Unidos para entregas urbanas (similar a um comercial leve ou caminhão semi-leves) a partir da tecnologia híbrida hidráulica, sendo o primeiro veículo da sua categoria no mundo a utilizar essa tecnologia, conforme apresentado na Figura 127. O veículo apresenta eficiência entre 60% a 70% maior que os veículos convencionais com o mesmo perfil, com redução de 40% na emissão de CO₂ (USA/EPA, 2015).



Figura 127 – Primeiro UPS com a Tecnologia Híbrida Hidráulica do Mundo

Fonte: USA/EPA, 2015

Devido às altas eficiências alcançadas com as unidades hidráulicas na conversão entre armazenagem e uso, híbridos hidráulicos apresentam potencial de economia de consumo de energia maior que qualquer outra tecnologia híbrida. Híbridos elétricos, por exemplo, chegam a eficiência de cerca de 40% em relação a veículos comuns (USA/EPA, 2015; KUTZ, 2008). Tal eficiência se traduz em menor consumo de derivados de petróleo e, portanto, menos poluentes são emitidos. Todos os híbridos poluem menos que veículos convencionais movidos a gasolina e diesel, porém os hidráulicos necessitam de menos operações do motor (KUTZ, 2008). Assim, os veículos híbridos hidráulicos têm como vantagem a combinação de três fatores (USA/EPA, 2015; KUTZ, 2008):

- A tecnologia para sistemas híbridos hidráulicos custa menos para ser construída, dentre as tecnologias híbridas. Os componentes necessários têm alta disponibilidade no mercado, pois são resultantes de décadas de aplicações industriais e de transportes;
- Há economia de capital dada pela manutenção do freio provida pelo *design* diferenciado dos veículos. A vida útil do sistema de frenagem em um HHV é cerca de duas vezes maior. Por consequência, há menor desgaste no motor de combustão interna e na unidade de tração;
- A tecnologia permite redução do consumo de combustível derivado de petróleo.

A densidade energética por unidade de massa de um HHV é a maior dentre todos os tipos de híbridos. Isso se dá pela grande capacidade do fluido de prover um alto torque quando necessário, o que se traduz em uma melhor aceleração do veículo utilizando essa técnica (KUTZ, 2008). Para alcançar a máxima eficiência possível, há três funcionalidades presentes na tecnologia do sistema de veículos híbridos hidráulicos:

- Frenagem regenerativa: consiste na captura e armazenamento de energia das rodas. Essa energia estocada é utilizada para que o veículo comece a acelerar. Esse processo captura e reutiliza mais de 70% da energia normalmente desperdiçada durante os freios, além de reduzir o desgaste sofrido com o atrito;
- Motor desligado quando não for necessário: por não haver um sistema de transmissão e eixo conectando de modo convencional as rodas ao motor, este pode ser desligado quando não for requerido o seu uso e ativado por um controle híbrido quando necessário. Em áreas urbanas, em que o perfil de direção é mais parada e partida, isso resulta em um corte de energia consumida de cerca de 50%;
- Controle do motor ótimo: o sistema de controle do veículo comanda o motor, quando necessário, de modo a operar no ponto de eficiência ótimo para atingir o máximo de economia do combustível (USA/EPA, 2015).

O HHV tem dois tipos de configuração: em série e em paralelo. Em veículos convencionais, a potência é direcionada para as rodas pelo motor por meio da transmissão e do eixo. No sistema híbrido hidráulico em série, o motor não é conectado diretamente às rodas e existe uma bomba que utiliza a alta pressão do fluido armazenado em um acumulador para propelir o veículo. Nos veículos com o sistema em paralelo, há o motor convencional, mantido de maneira praticamente intacta, e um sistema de tração com a tecnologia híbrida hidráulica acoplada ao eixo do veículo. Para a configuração da série, há três modos de operação em HHV (USA/EPA, 2015; KUTZ, 2008):

- Aceleração leve/cruzamento curto: nesse modo, quando se pisa no acelerador, a bomba existente nessa configuração utiliza o fluido de alta pressão do acumulador para realizar o trabalho de girar as rodas. O fluido usado fica submetido a uma baixa pressão e assim é transferido para um reservatório de baixa pressão, como visto na Figura 128.

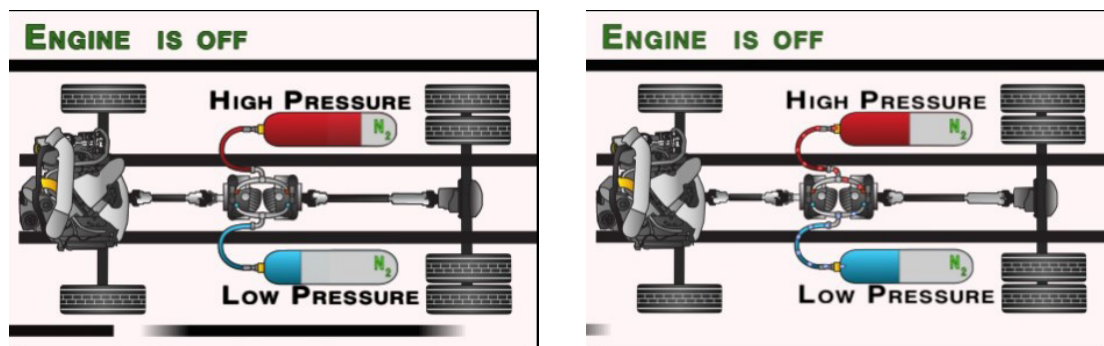


Figura 128 – Início e Fim da Etapa de Aceleração Leve/Cruzamento Curto em HHV em Série

Fonte: USA/EPA, 2015

- Aceleração brusca/cruzamento estendido: quando o nível de pressão cai a um determinado ponto, o motor é ligado e capta o fluido do reservatório, pressurizando-o e transferindo-o para a bomba. Excessos de fluido de alta de pressão não utilizados são armazenados no acumulador. Como o motor não é ligado às rodas, ele vai operar no ponto ideal, que é o ponto em que é mais eficiente quando ligado. O motor é desligado a partir do momento em que não é mais necessário, como apresentado na Figura 129.

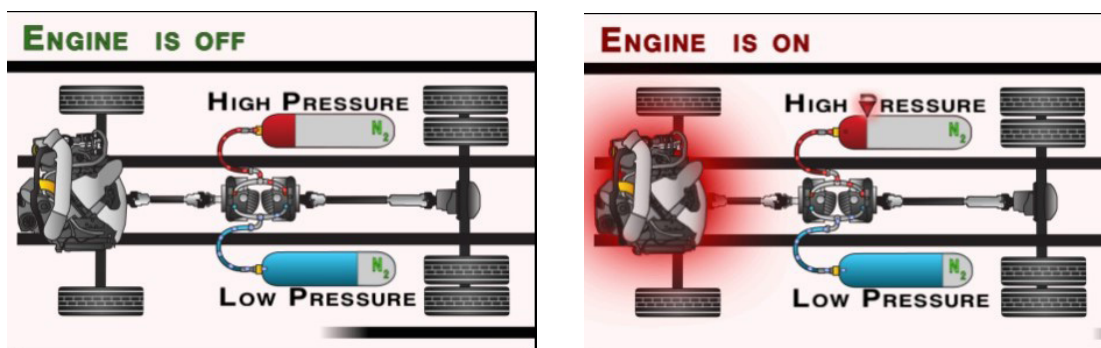


Figura 129 – Início e Fim da Etapa de Aceleração Brusca/Cruzamento Estendido em HHV em Série

Fonte: USA/EPA, 2015

- Frenagem regenerativa: o fluido é pressurizado no processo de frenagem. Quando o veículo começa a frear, a bomba usa o momento do veículo para pressurizar o fluido do reservatório e armazena-o no acumulador. Posteriormente, quando o veículo acelera, somente o fluido pressurizado é utilizado, como exibido na Figura 130. Esse processo de captura e reutilização aproveita mais de 70% da energia geralmente desperdiçada durante a frenagem (USA/EPA, 2015).

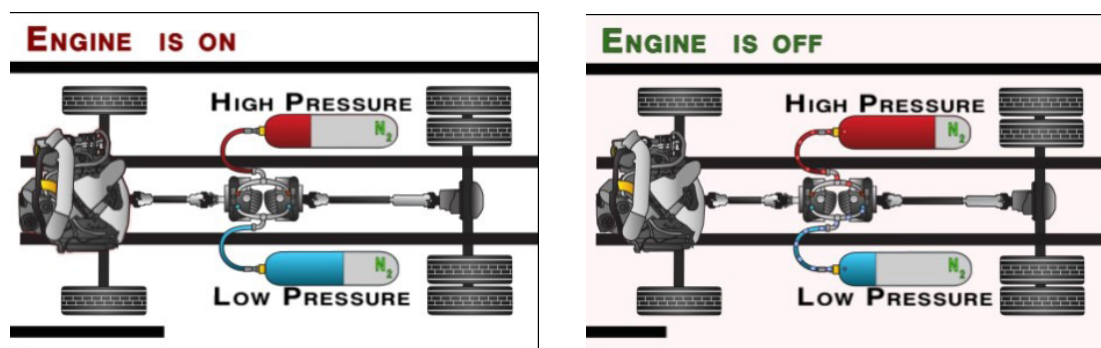


Figura 130 – Início e Fim da Etapa de Frenagem Regenerativa em HHV em Série

Fonte: USA/EPA, 2015

Para a configuração em paralelo, há quatro operações que ocorrem nos veículos. Cada operação é ilustrada por uma figura que descreve a etapa citada. As setas azuis correspondem ao fluxo de baixa pressão. As setas vermelhas são fluxos de alta pressão, e as verdes representam o fluxo de energia. O componente vermelho representa o acumulador de alta pressão, e o azul, o reservatório de baixa pressão.

- Frenagem regenerativa: ao frear, o dispositivo de bomba/motor é ativado e, agindo como bomba, utiliza a energia rotativa das rodas para bombear o fluido de baixa pressão do reservatório e transfere-o para o acumulador de alta pressão para ser utilizado posteriormente. Esse tipo de procedimento poupa os freios de atrito de serem utilizados para parar o veículo. A energia recuperada pode ser utilizada para reduzir o suprimento de energia durante acelerações bruscas ou leves.

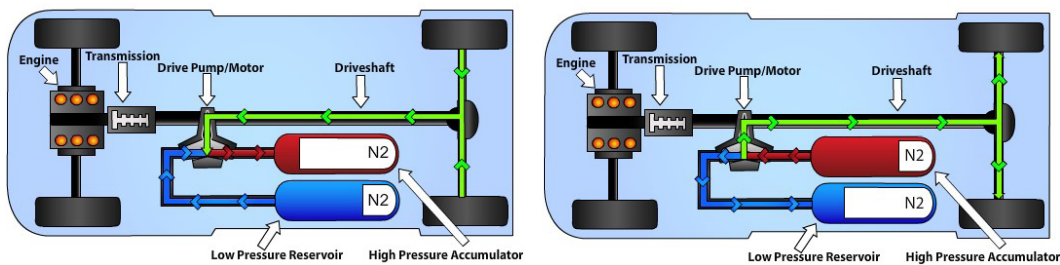


Figura 131 – Etapa de Frenagem Regenerativa em HHV em Paralelo

Fonte: USA/EPA, 2015

- Aceleração leve: durante essa operação, apenas a bomba/motor agindo como motor provê a potência para o eixo de transmissão. Isso poupa o motor de ter que acelerar o veículo, o que economiza energia.

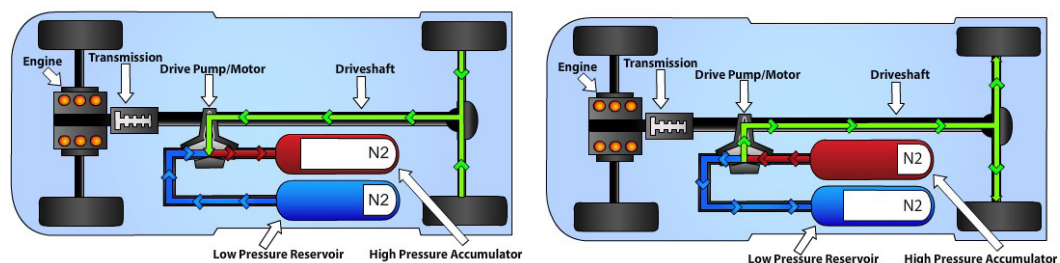


Figura 132 – Etapa de Aceleração Leve em HHV em Paralelo

Fonte: USA/EPA, 2015

- Aceleração estendida: durante acelerações estendidas ou bruscas, o dispositivo de bomba/motor, agindo como motor, é responsável por dar potência ao eixo em conjunto com o motor convencional, reduzindo a necessidade por potência provida pelo último. Isso acarreta economia de energia.

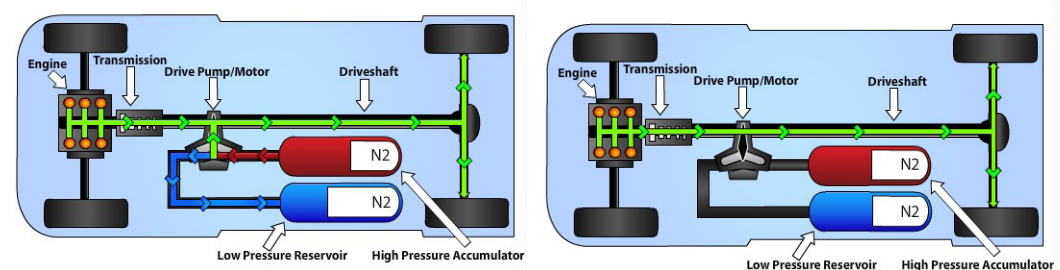


Figura 133 – Etapa de Aceleração Estendida em HHV em Paralelo

Fonte: USA/EPA, 2015

- Cruzamento: nessa etapa, o motor convencional é responsável exclusivamente por suprir a potência total requerida pelos freios, pelo eixo e pelo sistema de transmissão (BORETTI; STECKI, 2012; USA/EPA, 2015).

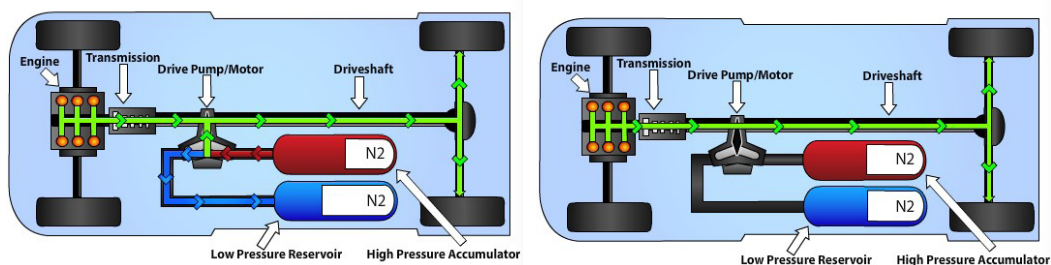


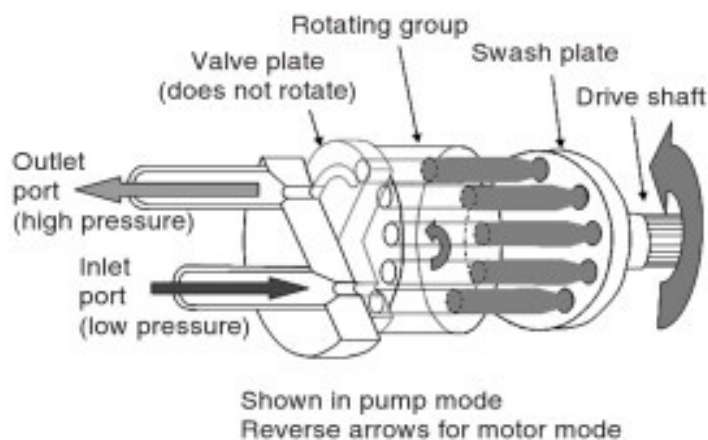
Figura 134 – Etapa de Cruzamento em HHV em Paralelo

Fonte: USA/EPA, 2015

7.1.4.1 COMPONENTES DO SISTEMA

Os dois principais equipamentos dos HHV são o motor hidráulico e o acumulador. A bomba/motor hidráulico é um elemento para alcançar alta eficiência entre as conversões de torque para a pressão do fluido. Pode ser operada como uma bomba para gerar pressão do fluido a um determinado torque aplicado, ou pode ser utilizada como motor para produzir torque pela pressão fluídica. O máximo de pressão utilizada corresponde a 5.000 lb/m² com vazões de até 100 galões por minuto (KUTZ, 2008).

Há dois tipos de bomba/motor utilizados em sistemas híbridos: bomba de prato oscilante e bomba/motor de eixo curvo. Os dois tipos são unidades axiais com base em pistões no interior de uma caixa de rotação em que a pressão de fluido é controlada por uma válvula fixada no topo dessa caixa. Ambos apresentam alta eficiência na conversão, de mais de 85%, porém o de eixo curvo tem potencial para eficiência de 90%. Por outro lado, o de prato oscilante tem *design* mais durável (KUTZ, 2008).



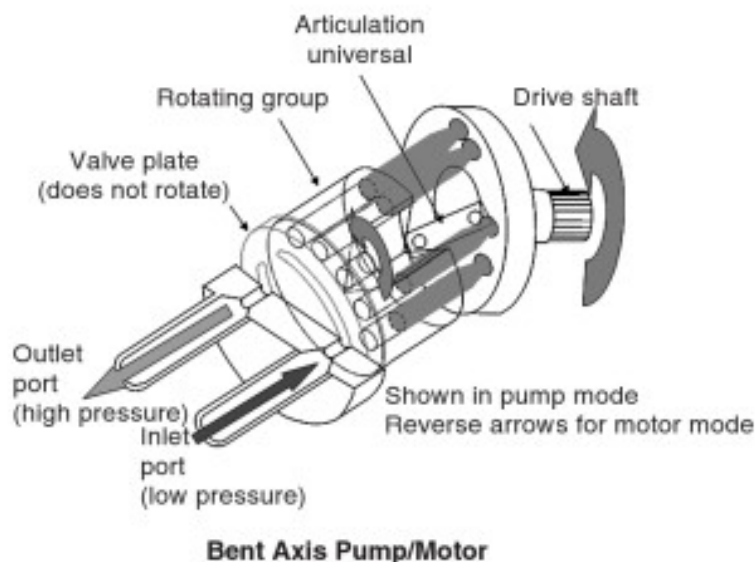


Figura 135 – Bomba de Prato Oscilante (página anterior) e Bomba/Motor de Eixo Curvo (acima)
 Fonte: KUTZ, 2008

Acumuladores, por sua vez, são dispositivos que mantêm o fluido hidráulico pressurizado. Para que isso ocorra, esse componente utiliza nitrogênio (N_2). Quando o fluido é bombeado para um acumulador, o nitrogênio é comprimido. A pressão do nitrogênio comprimido pode chegar a 5.000 psi. Quando é esvaziado, a pressão do nitrogênio cai para 2.000 psi. No reservatório de baixa pressão, quando cheio, varia entre 60 psi a 200 psi (USA/EPA, 2015). Acumuladores também têm a função de amortecer ruídos e vibrações transmitidos pelo fluido no sistema (KUTZ, 2008).

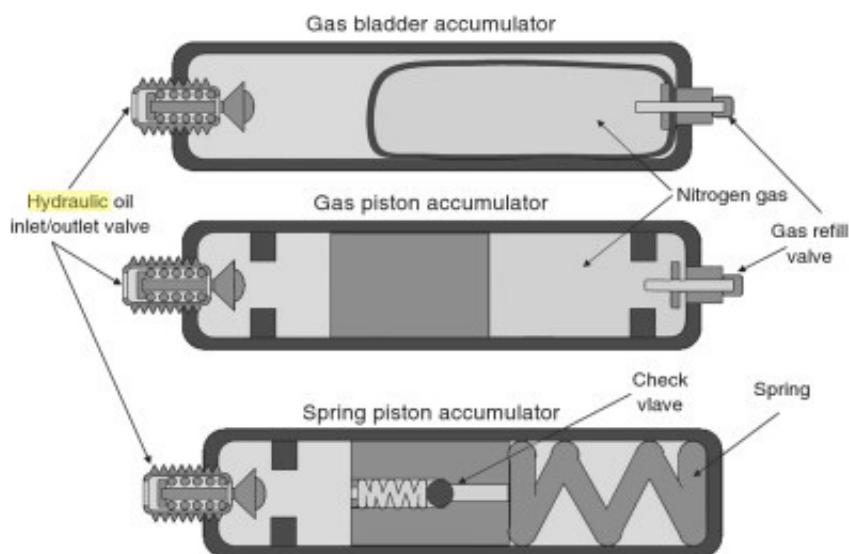


Figura 136 – Tipos de Acumulador
 Fonte: KUTZ, 2008

Há dois tipos de acumulador utilizados por projetos desenvolvidos pela EPA: o de bexiga e o de pistão. No primeiro, o fluido hidráulico comprime uma bexiga, impermeável ao fluido, que contém nitrogênio com a finalidade de criar pressão. O gás comprimido mantém pressão sobre o fluido até que ele seja liberado pelo acumulador. Tem a vantagem de apresentar 97% de retenção de energia durante os testes aplicados, porém é necessária uma recarga periódica do nitrogênio, que escapa pela bexiga ao longo do tempo (KUTZ, 2008).

No acumulador de pistão, a pressão é criada quando o fluido hidráulico empurra um pistão de metal, comprimindo o nitrogênio em um cilindro metálico. Nesse caso, não há vazamento de nitrogênio, porém é um tipo de acumulador mais pesado e menos eficiente que o de bexiga (KUTZ, 2008). Outro tipo de acumulador que pode ser utilizado para híbridos hidráulicos é o pistão de mola (KUTZ, 2008).

Além desses equipamentos, há o sistema de controle, que tem como função regular a distribuição de potência entre duas fontes de energia nos veículos híbridos. O sistema de controle permite maximizar a eficiência em termos de consumo de energia, utilizar a frenagem regenerativa para armazenar energia o máximo possível, utilizar a energia armazenada para as operações de aceleração ou cruzamento o mais rápido possível e monitorar o nível de carga da fonte de energia secundária (KUTZ, 2008).

Como desafios para o futuro, há a necessidade de otimização do *design* e do sistema de controle dos veículos híbridos hidráulicos. Melhorias no sistema incluem inovações nas operações de freio e no dispositivo de tração, dimensionando adequadamente os componentes hidráulicos e o motor de combustão interna para alcançar a performance de veículos padrão. Desse modo, poder-se-iam criar protótipos que alcançassem patamares de eficiência mais altos que os demonstrados atualmente (KUTZ, 2008).

A capacidade de HHV é limitada por pressão e volume máximos dos acumuladores. A partir desse ponto máximo, o acumulador precisa ser fechado ou pode haver o risco de alimentar a bexiga por meio de um orifício de saída. Como o aumento do tamanho do acumulador é algo pouco provável de ser explorado, pesquisas devem focar em aumentar o limite superior da pressão e em formas alternativas de armazenamento de energia. Além disso, deve-se pensar em materiais e *design* de componentes hidráulicos capazes de resistir de maneira segura à força e à capacidade demandadas por HHV em pressões tão altas (KUTZ, 2008).

Seguindo nessa linha, outro ponto a se pensar é a otimização dos espaços destinados aos componentes do sistema, o que requer um processo extensivo de reformulação. A situação é mais crítica quando se pensa em veículos mais leves (BORETTI; STECKI, 2012).

Em sistemas hídricos hidráulicos, é necessário que o fluido seja mantido com um nível ínfimo de impurezas. No entanto, haverá desgaste e erosão em partes do sistema, bem como envelhecimento e deterioração das partes vedantes e de outros componentes, e isso precisa ser filtrado do fluido. Desse modo, são necessárias pesquisas que monitorem a performance dos fluidos, assim como descobrir novos meios para estender o aumento da sua vida útil e aumentar a qualidade do tipo de material para reduzir os desgastes e erosão (KUTZ, 2008).

7.1.5 SISTEMA DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA

É esperado que o transporte ferroviário de alta velocidade tenha impacto nas grandes cidades, reduzindo o tempo de viagem e permitindo ligação direta entre áreas centrais de maior urbanização (LEE et al., 2014; YIN; BERTOLINI; DUAN, 2014). A levitação magnética, nesse aspecto, permite a construção de veículos mais leves, com menor poluição sonora e consumo energético, possibilidade de curvas de raios menores e rampas mais acentuadas, fatos que, somados, reduzem os gastos na implantação desse sistema, quando comparado com sistemas convencionais de roda-trilho (JAYAWANT, 1981).

Desde a concepção inicial de um veículo de levitação magnética em 1960, Alemanha e Japão alcançaram protótipos operacionais em níveis industriais de trens concebidos a partir dessa tecnologia. Desde 1990, a americana Inductrack, a suíça Swissmetro e a coreana UTM têm estudado intensivamente os componentes da levitação magnética e uma série de protótipos vem sendo construída. A Transrapid, em Xangai (China), e a HSST (High Speed Surface Transport), em Nagoya (Japão), estão em operação desde dezembro de 2003 e março de 2005, respectivamente.

Os trens de levitação magnética oferecem inúmeras vantagens quando comparados aos sistemas convencionais roda-trilho, como redução do custo de manutenção (EASTHAM et al., 1987), redução no custo de construção da via devido à distribuição da carga, maior confiabilidade, diminuição no risco de descarrilamento (NAKASHIMA, 1994), redução de ruído e vibração (WANG; WANG, 2010), além de permitir maior aceleração e desaceleração.

No entanto, alguns outros pontos devem ser levados em consideração. O primeiro diz respeito à característica intrínseca do sistema. Por se tratar de um trem de levitação, não há contato do veículo com o trilho, sendo assim, o sistema de tração deve prover também força de frenagem. Outro ponto importante é que quanto maior a carga, maior a energia gasta para fazer o sistema levantar, o que o torna inadequado para o transporte de carga. O Quadro 15 mostra um resumo da comparação entre a tecnologia de levitação magnética com o sistema convencional roda-trilho.

Quadro 15 – Comparação entre a Tecnologia de Levitação Magnética com o Sistema Convencional Roda-Trilho

	Sistema de Levitação	Sistema Roda-Trilho
Ruído e vibração	Sem contato mecânico 60-65 [dB]	Com contato mecânico roda-trilho 75-80 [dB]
Segurança	Menor risco de descarrilamento	Maior risco de descarrilamento
Trilho	Veículo leve e carga distribuída ao longo do trem	Veículo pesado e carga concentrada no contato roda-trilho
Manutenção	Reduzida	Reposição periódica de rodas, trilhos, etc.
Curvas	30 m de raio	150 m de raio

Fonte: HYUNG-WOO LEE; KI-CHAN KIM; JU LEE, 2006

Os responsáveis pela força de tração em veículos de levitação magnética são os motores elétricos lineares. Esses motores apresentam algumas diferenças em relação aos motores elétricos convencionais, tornando-os adequados a esse tipo de operação. A principal característica desse equipamento está na ausência do acoplamento mecânico entre a parte estacionária e a motriz, necessário nos motores convencionais para que ocorra o movimento retilíneo do veículo. A Figura 137 ilustra o conceito de um motor linear, criado a partir de um motor rotacional convencional. Em resumo, um motor linear nada mais é que um motor rotativo convencional, em que as partes, estatórica (primário) e rotórica (secundário), são cortadas e planificadas. Uma vez que no motor convencional o tamanho dessas partes é limitado, pode-se optar por alongar o primário ou o secundário do motor. Assim, a parte alongada é posta na via e a parte reduzida é colocada no veículo que vai se deslocar linearmente.

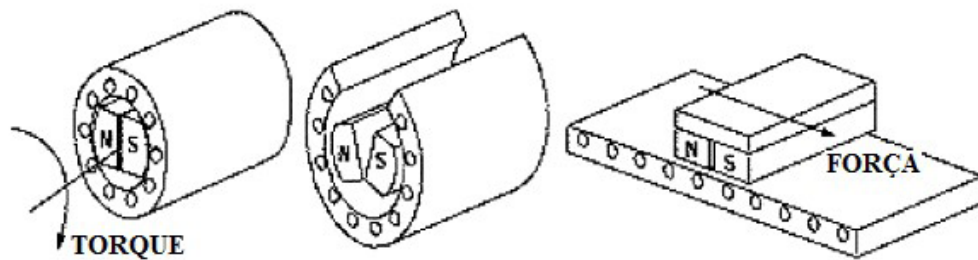


Figura 137 – Concepção de um Motor Linear a partir de um Motor Elétrico Convencional

Fonte: Elaboração própria

Uma desvantagem desse tipo de construção é o alto valor da distância do entreferro (distância de separação entre o primário e o secundário). Esse aumento implica redução na eficiência do motor. Porém, levando em consideração a ausência de perdas no acoplamento mecânico do motor com a carga, a eficiência final de um motor linear supera a de um motor rotativo convencional. Assim como os motores convencionais, os elétricos lineares podem ser divididos em dois tipos: motor de indução linear (*linear induction motor* – LIM) e motor linear síncrono (*linear synchronous motor* – LSM). O controle e o acionamento de cada uma dessas configurações são feitos de maneira análoga ao adotado em motores convencionais.

Tipicamente, existem três tipos de levitação magnética. As técnicas de levitação magnética baseadas em efeito eletromagnético (*electromagnetic levitation* – EML) ou eletrodinâmico (*electrodynamic levitation* – EDL), estudadas principalmente por Alemanha e Japão há mais de 40 anos, só se tornam economicamente interessantes para altas velocidades (>350 km/h) (SCHACH; JEHLE; NAUMANN, 2006). Por sua vez, o método de levitação utilizando supercondutores (*superconducting magnetic levitation* – SML) encontra seu nicho de aplicação no transporte urbano de baixa velocidade e vem sendo estudado por Brasil, Alemanha e China. A importância da levitação magnética aplicada a transportes de passageiros, tanto para alta velocidade quanto para transporte urbano, fica retratada nos principais projetos em desenvolvimento atualmente no mundo e registrados no Quadro 16.

Quadro 16 – Principais Projetos de Veículos de Levitação Magnética no Mundo

Pais	Empresa	Levitação	Tração	Local
Alemanha	Transrapid	EML	LSM	Emsland – 30 km
China	Transrapid	EML	LSM	Xangai – 30 km
Japão	JR – MagLev	EDL	LSM	Yamanashi – 40 km
Estados Unidos	AMT(MagLeft)	EML	LIM	Geórgia – ODU (1 km)
	GA	EDL-PM	LSM	Califórnia (500 m)
	Maglev 2000	EDL-sup	LSM	Flórida
	MagneMotion	EML-PM	LSM	MA (30 m)
	Mag Plane	EDL-PM	LSM	Massachusetts (MA)
Japão	HSST-Linimo	EML	LIM	Nagoya (9 km)
China	Estatal	EML	LIM	Shanghai (1,7 km)
	Estatal	EML	LIM	Tangshan (1,5 km)
	Estatal	EML	LIM	Zhuzhou (1,5 km)
	Jiaotong Uni.	SML	LIM	Chengdu (7 m)
Coreia	KIMM & KRRI	EML	LIM	Incheon Airport (6,1 km)
Alemanha	IFW	SML	LIM	Dresden (30 m)
Brasil	UFRJ-COPPE	SML	LIM	Rio (200 m)

Legenda: LIM – linear induction motor; LSM – linear synchronous motor; PM – permanent magnet; sup – supercondutor; EML, EDL, SML – tecnologias de levitação

Fonte: SOTELO et al., 2014

Os veículos de levitação magnética podem economizar energia quando comparados com outros meios de transporte de passageiros para longa distância, como veículos convencionais roda-trilho e aviões. Em geral, o consumo energético (MJ/pkm) de um trem de levitação magnética corresponde a 1/3 do consumo específico das aeronaves e dos TAV com tecnologia convencional roda-trilho (WANG; WANG, 2010).

7.15.1 LEVITAÇÃO ELETROMAGNÉTICA (EML)

A levitação eletromagnética ou levitação por atração é aquela em que um corpo de material ferromagnético se mantém suspenso pelo equilíbrio entre as forças peso e uma força eletromagnética atuante no corpo. A força eletromagnética pode ser gerada, por exemplo, por um eletroímã, como mostrado na Figura 138. O eletroímã é responsável por produzir essa força de atração, cujo comportamento se dá em função da distância entre os elementos do sistema (esfera e eletroímã) e da corrente que circula na bobina. Esse sistema é instável, uma vez que qualquer variação de corrente ou na posição da esfera faz com que ela se desprenda ou grude no eletroímã. Portanto, para que o sistema se torne estável, é necessário um aparato de controle robusto, uma das dificuldades desse tipo de levitação.

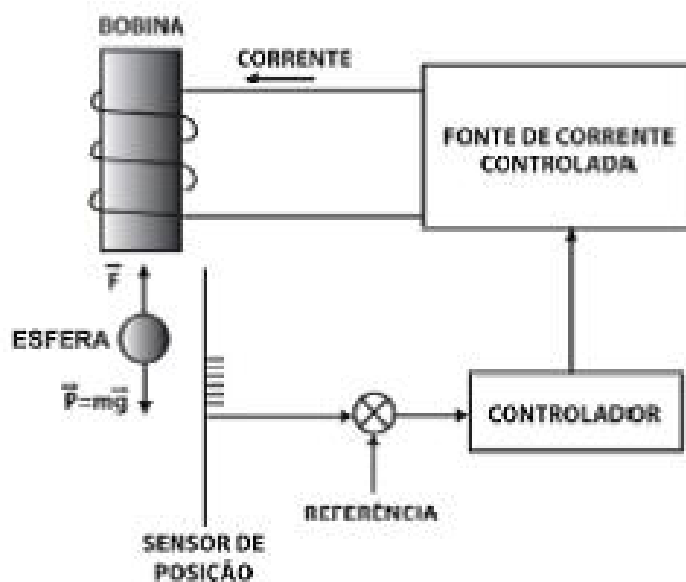


Figura 138 – Demonstração de Sistema de Levitação Eletromagnética por uma Esfera Metálica e um Eletroímã

Fonte: Elaboração própria

Com base nesse princípio, pode-se construir um veículo de levitação eletromagnética (JAEWON LIM et al., 2013). O sistema de levitação é composto por eletromagnetos laterais que mantêm o veículo lateralmente estável no trilho e eletromagnetos na parte inferior do trem que mantêm o veículo levitando. Tanto a estabilidade lateral quanto a levitação são alcançadas devido à interação dos eletromagnetos com uma parte de material ferromagnético fixa no trilho, cujo princípio de funcionamento é análogo ao utilizado para levitação da esfera (Figura 138).

O sistema de tração desse veículo é feito por meio de um motor linear síncrono. Uma corrente alternada imposta no enrolamento do estator gera uma onda trafegante para que o trem entre em movimento. A variação da frequência dessa onda faz o trem diminuir ou aumentar a velocidade, permitindo aceleração e frenagem do veículo.

O Transrapid foi o primeiro a se utilizar desse tipo de levitação e teve sua versão comercial inaugurada na China, fazendo o trajeto entre o aeroporto de Pudong e o centro de Xangai (LUGUANG, 2006). Os veículos desse sistema podem operar em velocidades de até 430 km/h, percorrendo todo o trajeto de 30 km em um tempo de oito minutos. Além da China, os Estados Unidos se mostraram um importante mercado para implantação desses sistemas de transporte. Em função de um programa de governo criado para incentivar o desenvolvimento dessa tecnologia no país, diversos projetos foram iniciados. Porém, devido à escassez de fundos, as atividades foram descontinuadas (TRANSRAPID, 2014). Para os veículos que operam em baixa velocidade, destacam-se os projetos em desenvolvimento e em fase de operação comercial na China, na Coreia (PARK; SHIN; HAN, 2009) e no Japão (YOSHIHIDE et al., 2003).

7.1.5.2 LEVITAÇÃO ELETRODINÂMICA

A levitação eletrodinâmica é baseada na lei de indução de Faraday-Lenz. É sabido do eletromagnetismo que, pela lei de Faraday, a variação do fluxo magnético próximo a um condutor gera uma corrente induzida no material. A lei de Lenz diz que essa corrente induzida deve ser de sentido contrário à variação do campo magnético que a gera. Havendo diminuição do fluxo magnético, a corrente criada gerará um campo magnético de mesmo sentido do fluxo magnético da fonte. Havendo aumento, a corrente criada gerará um campo magnético oposto ao sentido do fluxo magnético da fonte.

Esse tipo de levitação teve sua aplicação pioneira no projeto do trem japonês, desenvolvido pela Japanese Railways (JR-MagLev) (JAPAN/RTRI, 2014). Nesse sistema, um trem com rodas se desloca sobre trilhos convencionais antes de começar a levitar. A lateral do veículo é cercada por um trilho lateral formado por bobinas de material condutor. Paralelamente ao trilho, corre a lateral do veículo, onde são instaladas bobinas supercondutoras responsáveis pela produção de um campo magnético intenso. Esse campo induz corrente nas bobinas condutoras do trilho lateral, gerando um campo magnético que se opõe à variação do campo magnético gerado pelas bobinas supercondutoras. A interação entre esses campos gera uma força repulsiva que faz o trem levitar. A velocidade necessária para fazer o trem começar a levitar é de aproximadamente 120 km/h.

Diferentemente do sistema de levitação eletromagnética, a levitação eletrodinâmica permite uma sustentação estável e passiva. Porém, as complicações existentes em um sistema mecânico de rodas não são eliminadas. Os custos de implantação são bem altos, e o consumo de energia é bastante elevado (SCHACH; JEHLE; NAUMANN, 2006).

7.1.5.3 LEVITAÇÃO SUPERCONDUTORA

A levitação supercondutora se dá pela interação entre o campo magnético e o supercondutor. Devido às propriedades magnéticas intrínsecas desses materiais, é possível obter uma levitação altamente estável (HULL; MURAKAMI, 2004; MOON, 1994), tornando-se extremamente vantajosa quando comparada à levitação eletromagnética. Devido a essa característica, a utilização de um mecanismo de controle não se faz necessária. Com relação ao sistema eletrodinâmico, apesar de também apresentar estabilidade, a levitação só ocorre após o trem entrar em movimento. Esse fato não permite a ausência total do sistema roda-trilho convencional, o que não ocorre com a levitação supercondutora.

Atualmente, os únicos protótipos em desenvolvimento no mundo encontram-se em universidades e/ou centros de pesquisa do Brasil (SOTELO et al., 2014), da Alemanha (KUEHN et al., 2007) e da China (JIANG et al., 2012). No Brasil, essa tecnologia vem sendo estudada por grupos de pesquisa da UFRJ, no Laboratório de Aplicações de Supercondutores (Lasup), desde 1998. Em 2005, foi concluído um protótipo em escala reduzida, que utiliza blocos supercondutores cerâmicos e ímãs permanentes para levitação. Atualmente, o protótipo encontra-se em fase operacional com uma linha de teste de 200 metros, que faz a ligação entre dois prédios do Centro de Tecnologia da UFRJ. A foto dessa linha de teste pode ser vista na Figura 139.



Figura 139 – Linha Teste de 200 m em Construção no Brasil

Fonte: SOTELO et al., 2014

O Instituto Leibniz (IFW), em Dresden, na Alemanha (Figura 140) (SUPRATRANS, 2015), e a Southwest Jiaotong University, em Chengdu (JIANG et al., 2012), na China, também têm protótipos em escala reduzida, com extensões de 30 metros e 7 metros, respectivamente.



Figura 140 – Protótipo de Veículo de Levitação Supercondutora Desenvolvido pelo IFW na Alemanha

Fonte: SUPRATRANS, 2015

Um dos principais fatores responsáveis pela elevação do custo final de um sistema de levitação supercondutora é o trilho magnético, composto basicamente por blocos de ímãs de neodímio-ferro-boro (Nd-Fe-B). Devido a isso, a utilização desse tipo de veículo para longas distâncias torna-se inviável, restringindo sua utilização a distâncias mais curtas, como para o transporte urbano (STEPHAN; DE ANDRADE; FERREIRA, 2012).

7.1.6 AVIÃO SOLAR

Desde 1974, quando surgiu o primeiro avião movido a energia solar do mundo, pesquisadores e cientistas se interessaram por explorar e desenvolver essa tecnologia pelo fato de ela representar a maior expectativa de uso de energia limpa para esse tipo de modal. Aviões solares são ecologicamente sustentáveis por não apresentarem emissões de GEE e têm potencial de aplicação em diversas áreas.

Nos aviões solares, a aeronave é equipada por células fotovoltaicas e baterias recarregáveis. As células se localizam nas asas do avião e são utilizadas para captar a energia da radiação solar para então convertê-la em energia elétrica e fornecê-la ao sistema de propulsão e ao sistema eletrônico de controle. Os principais componentes do avião solar são: painéis solares; baterias recarregáveis; motor; local da tripulação; e sistema de gerenciamento de energia (Figura 141).

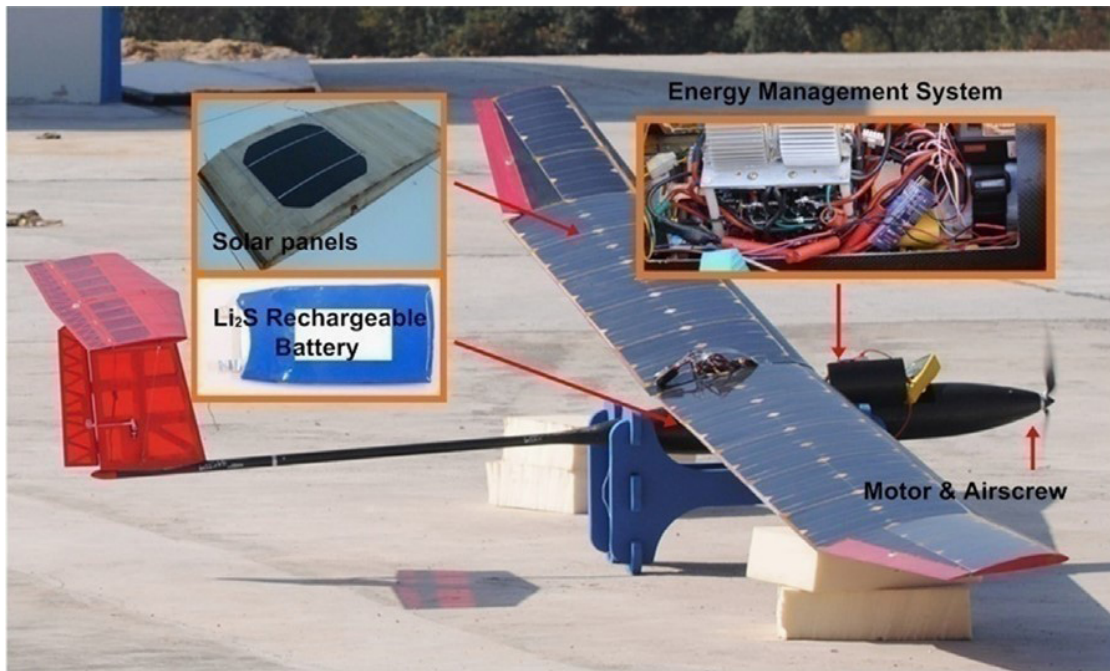


Figura 141 – Componentes de uma Aeronave Movida a Energia Solar

Fonte: GAO et al., 2015

O sistema de gerenciamento de energia – *energy management system* (EMS) – é responsável pelo controle do sistema de energia para que o avião possa fazer um voo contínuo por mais de um dia (GAO et al., 2015). Outro componente necessário é o equipamento de monitoramento de ponto de máxima potência – *maximum power point tracking* (MPPT) –, que monitora a tensão das células e das baterias e, por meio de ganho ajustável, viabiliza a maximização da energia extraída das células fotovoltaicas. O MPPT é acoplado ao EMS, como demonstra a Figura 142 (GAO et al., 2015).

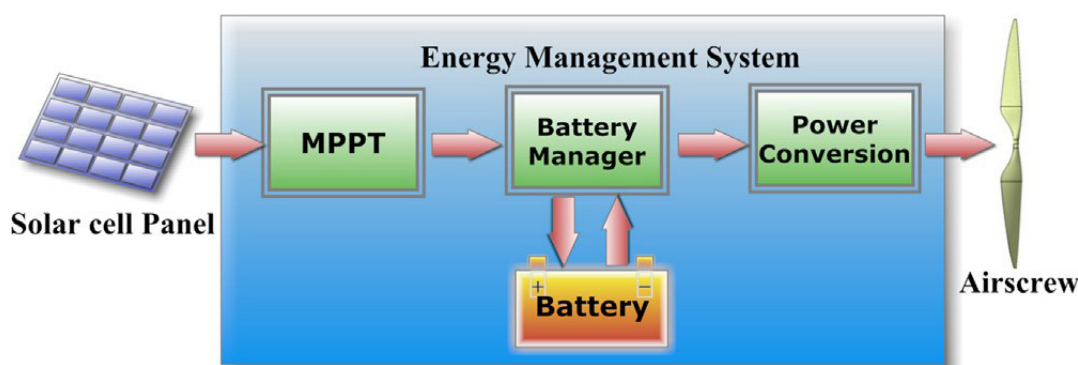


Figura 142 – Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS) de um Avião Movido a Energia Solar

Fonte: GAO et al., 2015

A energia disponível compensa a consumida ao longo das viagens, o que é uma grande vantagem desse tipo de tecnologia. Isso ocorre dado que a energia que sobra é armazenada em baterias secundárias que a liberam em períodos noturnos dos voos (ZHU; GUO; HOU, 2014).

Os aviões solares têm potencial para voos em grandes altitudes e de longa duração devido ao suprimento de energia de que é capaz. Tal potencial é objeto dos mais recentes estudos propostos para os modelos de aeronaves solares. Há dificuldade para alcançar voos muito altos, dada a baixa pressão aerodinâmica para levantar o avião com o aumento da altitude. Para viabilizar essa condição de voos mais altos, é necessária a estrutura leve da aeronave, maior eficiência na captação da energia solar, maior capacidade de armazenamento e sistemas de propulsão cuidadosamente planejados (ZHU; GUO; HOU, 2014). Dependendo das condições do tempo e do sistema do avião, podem-se obter voos de duração mensal e até anual (ZHU; GUO; HOU, 2014).

O primeiro avião do mundo movido a energia solar foi o Sunrise. O seu protótipo, Sunrise I, foi projetado por R. J. Boucher, que tinha bastante interesse por projetos de energia solar, pois, apesar de seus altos custos e dos investimentos necessários, tinha uma fonte de energia inexaurível (HOFFBORN, 2009). O Sunrise I realizou sua primeira viagem em 1974, provando que uma aeronave poderia voar usando fonte de energia exclusivamente solar. Após uma série de voos realizados ao longo daquele ano, encontrou seu fim em uma tempestade durante um teste de voo. Foi construído o Sunrise II, com estrutura equivalente, porém 13% mais leve que o primeiro, com 33% a mais de capacidade de armazenamento de energia e melhor *design* aerodinâmico. Por conta de falhas no sistema e no controle, o Sunrise II não alcançou a altitude esperada de 15,2 km para seus voos, chegando apenas a 5,2 km. A aeronave ficou consideravelmente danificada e seus painéis solares foram removidos e acoplados a outra aeronave, a Gossamer Penguin, projeto criado cinco anos depois (ZHU; GUO; HOU, 2014).

O Gossamer Penguin e o Solar Challenger foram as aeronaves criadas por uma instituição do governo dos Estados Unidos, a AeroVironment, entre o fim da década de 1970 e início de 1980. Depois foi desenvolvida a Pathfinder, primeira aeronave solar com o objetivo de voar a grandes altitudes. A Pathfinder realizou um voo com altitude recorde de 15,4 km em 1995, após ser adotada por um projeto da Nasa, o Erast. Outro recorde foi obtido em 1997, com 21,5 km de altitude, após ser movido

para a ilha de Kauai, no Havaí, pertencente à marinha americana, e, em 1998, alcançou 24,4 km. A geração seguinte de avião solar do Erast foi o Centurion, com uma envergadura de 63,1 metros, aproximadamente o dobro de Pathfinder, e fez três voos de demonstração em meados de 1998, utilizando energia das baterias. O projeto seguinte lançado pelo Erast foi o Helios, que consistia basicamente numa modificação do Centurion, com mudanças nas dimensões das asas, rede de tração e sistema, que permitiram sustentar um voo de 30,5 km e duração mínima de 20 horas. No entanto, problemas em sua estrutura e turbulências durante um voo de teste em 2003 danificaram a aeronave (ZHU; GUO; HOU, 2014).

Outro projeto foi o Zephyr, originalmente criado para filmar balões enquanto tentava quebrar recordes de altitude em seus voos. Após uma sucessão de modelos, foi desenvolvido o Zephyr 7, que quebrou sucessivamente os recordes de altitude em seus voos e apresentou a evolução das aeronaves movidas a energia solar no projeto Zephyr. O projeto foi adquirido em 2013 pelo Programa Airbus's High Altitude Pseudo-Satellite (HAPS), iniciado pela Airbus em 2009 (ZHU; GUO; HOU, 2014).

Outros notáveis projetos incluem o SoLong, responsável por mostrar o funcionamento de voos de vários dias por fonte solar; o Heliplat, designado a voar a altitudes estratosféricas para prover informações sobre a área do mar Mediterrâneo; o Sky-Sailor, com o intuito de criar ultraleves movidos a energia solar que pudessem funcionar continuamente por dias e noites; e o Vulture, com o intuito de suportar voos de longa duração (ZHU; GUO; HOU, 2014).

O projeto de avião solar com maior notoriedade atualmente é o Solar Impulse. Fundado pelos suíços Bertrand Piccard e André Borschberg, trata-se de um projeto desenvolvido em 2004 cujo objetivo era apresentar o primeiro avião solar a dar uma volta ao mundo (SOLAR IMPULSE SA, 2015). O primeiro protótipo Solar Impulse, registrado como HB-SIA, tinha envergadura similar a um Airbus A340, porém com peso proporcional a um veículo automotivo regular. Seus sete recordes mundiais relacionados a voos por aviões solares incentivaram a construção do seu seguidor, o Solar Impulse 2 (SI2) (SOLAR IMPULSE SA, 2015).

O SI2 foi feito a partir de fibra de carbono e tem envergadura de 72 metros e massa de 2.300 kg. Acopladas a suas asas, existem cerca de 17.000 células fotovoltaicas para alimentar quatro motores elétricos de 17,5 CV. Tem baterias de lítio com massa total de 633 kg, cuja densidade energética é otimizada até 260 Wh/kg, operação em alta tensão (300 V) e capacidade máxima de armazenamento de energia de 38,5 kWh. Essas baterias permitem que o avião voe à noite e, portanto, tenham, na teoria, uma autonomia ilimitada (SOLAR IMPULSE SA, 2015).

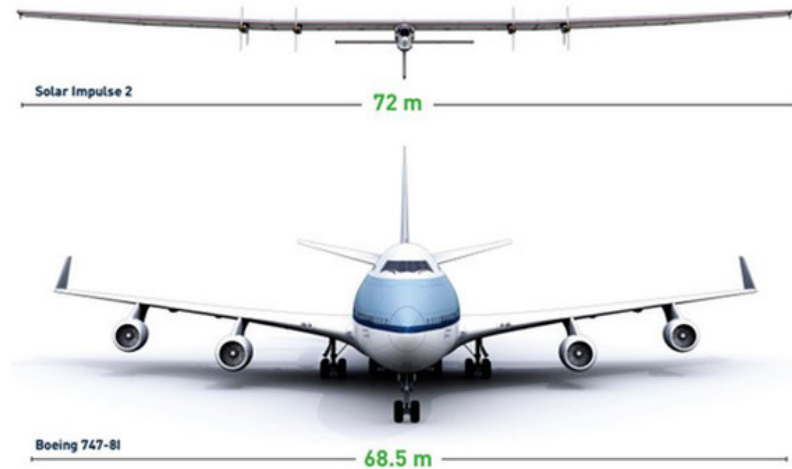


Figura 143 – Solar Impulse 2

Fonte: SOLAR IMPULSE SA, 2015

O Solar Impulse 2 tem como desafio voar por cinco dias e cinco noites consecutivas sem utilizar nenhum combustível. Para tal, requer a otimização de novos tipos de tecnologia e redução considerável do consumo de energia (SOLAR IMPULSE SA, 2015). O trajeto é feito em paradas. O avião saiu do seu ponto de origem, Abu Dhabi, no dia 9 de março de 2015, com destino a Muscat. Depois de paradas em seu trajeto, passando por Ahmedabad, Varanasi, Mandalay, Chongqing, Nanquim e Nagoya, chegou ao Havaí no dia 3 de julho de 2015. O percurso ainda inclui passagens por Phoenix, centro dos EUA, Nova Iorque, Europa e volta para o ponto de origem em Abu Dhabi (SOLAR IMPULSE SA, 2015).

Aviões solares ainda têm um longo caminho a percorrer para serem comercialmente viáveis como meio de transporte alternativo aos aviões convencionais. No entanto, há expectativas de aplicação no curto prazo em diversas outras áreas além do transporte. Essas áreas compreendem interesses civis, militares, comerciais, geológicos, agrários, astronáuticos etc.

7.1.6.1 COMPONENTES DO SISTEMA

Os principais equipamentos do avião solar incluem células fotovoltaicas, baterias, MPPT e sistema de informação. Nas células fotovoltaicas, um dos principais parâmetros para a medição da performance é a eficiência (η_{pc}), que mede o percentual de energia solar à qual a célula é exposta e que é convertida em energia elétrica (GAO et al., 2015), calculado pela Equação 29:

$$\eta_{pc} = \frac{P_M}{G \times S_c} \quad (\text{Eq. 29})$$

Onde P_M é o ponto de potência máxima da célula, G é o *input* de irradiação solar, S_c é a área da célula.

A eficiência varia de acordo com o tipo de célula que está sendo utilizada. Estudos mostram como a eficiência vem aumentando com o tempo, chegando a cerca de 44% na terceira geração de tecnologias fotovoltaicas (GAO et al., 2015).

Há cinco tipos de células disponíveis na indústria, porém apenas dois podem ser aplicados em aviões solares, a célula de silício e a de película fina, dada uma série de fatores como eficiência da célula, custo-benefício, peso, adaptação ao ambiente e confiabilidade (GAO et al., 2015).

A célula de silício consiste em silício monocristalino, silício multicristalino e silício amorfo. A maioria dos projetos de avião solar citados anteriormente utilizou o monocristalino. A eficiência da célula de silício para uso comercial está entre 16% a 22% (GAO et al., 2015).

A célula de película fina consiste em camadas de películas semicondutoras aplicadas sobre um material de suporte. Para o *design* de aviões solares, o tipo dessa célula que tem recebido maior atenção é o de arenito de gálio (GaAs) devido ao seu constante aumento na eficiência em conversão de energia. A maior eficiência já registrada pelo seu uso foi de 44% (GAO et al., 2015).

Apesar de as células de GaAs apresentarem maior eficiência, o uso das de silicone é predominante em aviões solares. Isso se deve ao fato de as células de GaAs serem três vezes mais pesadas que as de silício, o que consiste em um problema no uso de aviões, uma vez que quanto maior o peso da aeronave, maior a potência necessária em seu uso. Além disso, células de filme fino são consideravelmente mais caras, sendo mais recomendadas para o uso em satélites (GAO et al., 2015).

É por meio do uso de baterias recarregáveis que sistemas fotovoltaicos em aviões solares amenizam irregularidades da irradiação solar – dado que só concentram a energia solar a altas potências. Além disso, também são necessárias para armazenar energia que sobra durante o período diurno e suprir a demanda por energia em períodos noturnos (GAO et al., 2015). O principal parâmetro para medir a performance das baterias é a densidade energética, que é a quantidade de energia armazenada por unidade de massa, segundo a Equação 30:

$$\overline{m_b} = \frac{E}{m_b} \text{ (Eq. 30)}$$

Onde m_b é a massa da bateria recarregável, E é a energia armazenada.

Quanto maior a densidade energética, menos baterias precisam ser utilizadas e, assim, o peso não se torna um empecilho para as operações de voo, além de proporcionar maior margem de segurança quanto à energia disponível para voos noturnos (ZHU; GUO; HOU, 2014).

Há uma variedade de baterias recarregáveis disponíveis atualmente, porém as que apresentam maior densidade energética e são, portanto, mais propícias para uso em aviões solares são as de íon de lítio (Li-íon), polímero de íon de lítio (polímero Li-íon), enxofre de lítio (Li-S) e a célula a combustível (GAO et al., 2015).

Baterias Li-íon e polímero Li-íon são recarregáveis e apresentam altas densidades energéticas – cerca de 140 Wh/kg a 240 Wh/kg em aviões solares –, porém sua tecnologia ainda não é madura.

Há uma restrição associada ao grande peso da bateria: a energia requisitada à noite necessita de mais bateria, porém o peso adicional consome mais energia. Desse modo, o seu uso demanda redução significativa da massa do resto do avião e otimização da eficiência energética do sistema (GAO et al., 2015).

As baterias Li-S têm densidade energética teórica de 2.600 Wh/kg, dado o seu baixo peso – assumindo a reação completa entre o lítio com enxofre para obter Li_2S –, o que representa a maior energia específica teórica dentre as baterias recarregáveis existentes e a coloca na posição de tecnologia mais promissora para suceder as baterias Li-íon. É uma tecnologia especialmente adequada para ser aplicada em aviões solares, em que o peso é um fator crítico (GAO et al., 2015). Porém, testes de laboratório das baterias Li-S têm apresentado densidade energética de 350 Wh/kg, bem abaixo da teórica calculada (ZHU; GUO; HOU, 2014).

Células combustíveis fornecem alta energia elétrica pela reação sem combustão entre combustível e oxigênio. São mais eficientes e menos poluentes que outras baterias, por isso têm sido propostas para serem utilizadas em aviões solares com a expectativa de alcançar densidade energética de 400 Wh/kg. Têm a desvantagem de gerar grande complexidade na dinâmica do voo dada a sua massa concentrada (GAO et al., 2015).

O MPPT tem a função de fazer a correspondência entre a potência demandada pela carga e o ponto de máxima potência – *maximum power point* (MPP) – da célula fotovoltaica e travar a operação nesse ponto para extrair a potência máxima possível (GAO et al., 2015). As dificuldades para a realização dessa tarefa em aviões solares se dá pelas variações de irradiações solares e temperaturas do ambiente, que sofrem influência de mudanças de altitude, nebulosidade etc. O MPPT mantém a corrente e a tensão funcionando por uma potência máxima, independentemente de mudanças atmosféricas ou de carga, e otimiza a utilização de células fotovoltaicas (FAZELPOUR et al., 2013).

Além disso, o MPPT permite recarga maior da bateria utilizando a energia em excesso, já que é diretamente conectado a ela e ambos têm a mesma voltagem. Para possibilitar voos longos, é necessário o *design* de um MPPT eficiente e de baixo peso (FAZELPOUR et al., 2013).

Conforme mencionado anteriormente, aviões solares podem chegar a grandes altitudes por longos períodos. Devido à infinita fonte solar a que a aeronave tem acesso, ela teria potencial para funcionar como um satélite, orbitando por anos. Desse modo, tem o potencial de alcançar voos superiores a 30 km (ZHU; GUO; HOU, 2014).

O potencial de uso dessas aeronaves solares tem despertado o interesse de instituições militares, que pretendem usá-las para serviços de comunicação. Há, efetivamente, o emprego atual de aviões de alta resistência para a realização desses serviços, no entanto tais aviões podem operar apenas por dezenas de horas e consomem um volume considerável de combustível. Satélites também são utilizados, porém limitados a uma operação de órbita restrita e só oferecem serviços intermitentes, o que exigiria o funcionamento de vários satélites operando de maneira conjunta. Outros tipos de aeronaves também foram avaliadas, no entanto o avião solar ganha destaque pela capacidade exclusiva de explorar regiões de interesse, oferecer serviços não intermitentes e cobrir uma área relativamente grande – conforme se pode observar pela Figura 144 – por longos períodos, utilizando uma fonte de energia inexaurível (ZHU; GUO; HOU, 2014).

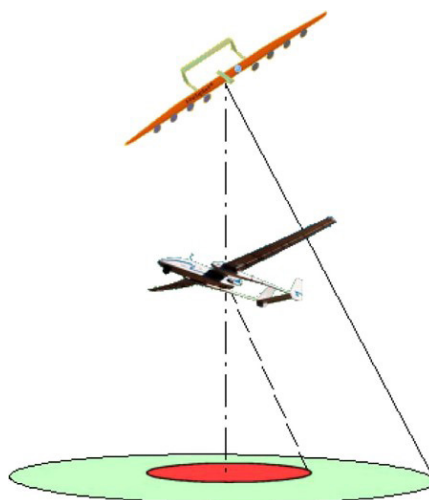


Figura 144 – Avião Solar Heliplat Sobrevoando a uma Altitude de 20 km e Cobrindo uma Área de Diâmetro de 300 km

Fonte: ZHU; GUO; HOU, 2014

Aviões solares também têm potencial de uso em atividades de comunicação no que diz respeito ao envio de ondas e sinais de alta frequência, como em sistemas de aparelhos celulares (ZHU; GUO; HOU, 2014).

O desenvolvimento de aviões movidos a energia solar encontra-se em fase extensa de desenvolvimento. Além de ser necessária a preocupação com eficiência do propulsor, *design* da aeronave e arrasto aerodinâmico, há alguns parâmetros de suma importância que devem ser abordados e planejados para que ocorram a viabilização e o êxito dessa tecnologia no longo prazo.

Nos dispositivos utilizados com mais frequência em aviões solares, registra-se um percentual de utilização energética de 11%, o que indica que cerca de 89% da energia solar irradiada se perdem, e a maior parte é perdida pela hélice e pela célula fotovoltaica. Desse modo, são necessárias otimizações no sistema de extração e armazenamento de energia ou métodos alternativos que proporcionem balanceamento de energia entre o dia e a noite (ZHU; GUO; HOU, 2014).

Células fotovoltaicas apresentam, conforme mencionado, variações de performance associadas às irradiações solares, temperatura, poeira, ângulo do avião, nebulosidade, velocidade do vento e umidade. A intensidade do sol varia de acordo com estação do ano, clima, tempo e local. A umidade causa degradação da irradiação e menor eficiência de extração de energia. A poeira tem o mesmo efeito (FAZELPOUR et al., 2013). Para que a melhor performance seja atingida, melhorias na eficiência do MPPT devem ser planejadas (ZHU; GUO; HOU, 2014).

Aviões solares têm um longo caminho pela frente se se considerar também a competitividade com aviões convencionais no que se refere à performance das baterias recarregáveis. Isso porque a densidade energética da gasolina é cerca de dez vezes maior que a de baterias mais usadas (ZHU; GUO; HOU, 2014).

Destaca-se também a preocupação com a redução da massa do avião, pois ele pode carregar um peso relativamente baixo por unidade de área da asa. Desse modo, deve-se planejar distribuição dos componentes, sistema do avião e carga, com o objetivo de uma tensão concentrada. Em aviões solares, as asas apresentam a maior massa e, portanto, devem receber maior atenção (ZHU; GUO; HOU, 2014).

Conforme já mencionado, aviões solares ainda não competem com os regulares dada a densidade energética relativamente baixa captada pela irradiação solar. Para contornar esse problema, seria necessária uma maior quantidade de baterias, porém há o problema de excesso de peso. Para tanto, poder-se-ia utilizar o método gravitacional para armazenar energia. Por esse método, propõe-se que a aeronave poderia ser projetada para chegar a grandes altitudes quando a irradiação solar é abundante, ou seja, em horários de meio-dia (ZHU; GUO; HOU, 2014). A energia excedente seria armazenada pelo potencial gravitacional. Assim, em períodos noturnos, quando essa irradiação não é abundante, o avião poderia voar em altitudes mais baixas, mantendo-se no ar utilizando a energia armazenada. Esse método elimina os problemas trazidos pelo peso da bateria (GAO et al., 2015).

O projeto Solar Impulse utilizou o método do potencial gravitacional com êxito, chegando a 8.000 metros de altitude durante o dia e, após o armazenamento de energia, descendo a cerca de 1.500 metros à noite. Quando atinge a menor altitude possível, as baterias são acionadas para manter o voo até que amanheça novamente (GAO et al., 2015).

Outro método que vem sendo abordado é o do cisalhamento do vento. É baseado em uma técnica utilizada pelo albatroz, chamado voo dinâmico, em que se extrai energia subindo contra a direção do vento e planando no mesmo sentido que ele. Dado que ventos cruzados geralmente aparecem do chão para altitudes maiores que 20 km, aviões solares podem conservar energia utilizando o voo dinâmico, mantendo-se no ar por tempo indeterminado por uso repetitivo dessa manobra (GAO et al., 2015; ZHU; GUO; HOU, 2014).

Nas próximas subseções, são apresentadas as premissas e estimativas consideradas com a entrada das novas tecnologias relacionadas aos diferentes modais, com o intuito de fornecer as bases de projeção para o consumo de energia e emissões de GEE do setor de transportes no horizonte 2050.

7.2.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

A projeção da frota de veículos leves no período de simulação é baseada na metodologia do capítulo 4, acrescida da penetração de novas tecnologias, como: automóveis a célula a combustível e ônibus urbanos movidos a etanol. Em relação à curva de sucateamento por categoria de veículos, os parâmetros utilizados também seguem a mesma metodologia, de modo que, para fins de simulação do cenário de inovação, estima-se que esse perfil de sucateamento não sofrerá alteração ao longo do horizonte de análise.

A introdução dos ônibus urbanos movidos a etanol se inicia em 2020, chegando a 67% da frota em 2050, o que representa a totalidade da frota urbana de todas as capitais nacionais com população superior a 1 milhão de pessoas.

Os automóveis a célula a combustível (hidrogênio) inicialmente surgem como substitutos dos veículos *flex fuel*, que alcançam um pico de 53 milhões de veículos por volta do ano de 2035. Introduzidos a partir desse mesmo ano, os veículos a hidrogênio chegam em 2050 com cerca de 14% da frota nacional de automóveis, passando a substituir também os veículos híbridos. Os veículos híbridos, que apresentam forte crescimento desde 2020, só ultrapassam a frota de veículos *flex fuel* no ano de 2049, representando 34% da frota nacional em 2050. Os automóveis *flex fuel* ficam logo atrás, representando 30% da frota em 2050, enquanto os veículos a bateria chegam a 11,5%, *plug-in flex* com 8,5% e a gasolina com apenas 3% de participação. No caso dos veículos *flex*, o percentual da frota de veículos bicomcombustíveis com opção pelo etanol é análogo ao cenário BC.

Dessa forma, a composição da frota de veículos automotores para transporte de passageiros no país apresenta perfil semelhante à do capítulo 6, com destaque apenas para a penetração das novas tecnologias, conforme exibido na Figura 145.

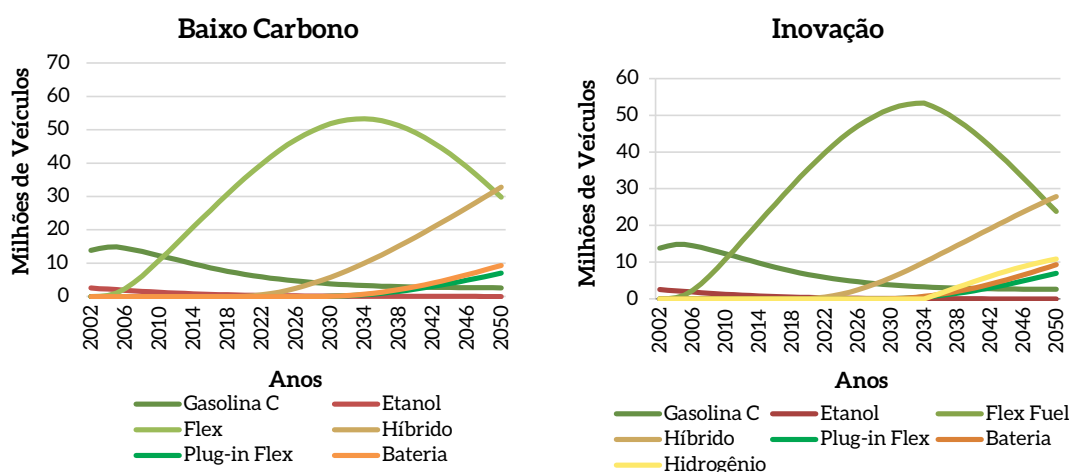


Figura 145 – Evolução da Frota Circulante dos Automóveis – Cenários BC e BC+I

Fonte: Elaboração própria

Para fins de simulação, considera-se que os ônibus a etanol apresentam consumo específico de 3,8 km/l, enquanto os veículos a hidrogênio podem rodar 28 km com um metro cúbico de hidrogênio. Quanto às emissões do setor, assumiu-se que não há emissão relacionada ao uso final desses combustíveis. Nota-se que tal premissa somente será válida se não houver emissão associada com a produção do hidrogênio e se não houver emissão de desmatamento associada à produção de etanol.

7.2.2 TRANSPORTE DE CARGA

No caso do transporte rodoviário de cargas, o crescimento do modal está atrelado à taxa de crescimento médio anual das mercadorias transportadas. Ou seja, a projeção das vendas de veículos pesados por cada classe é ajustada para atender o cenário macroeconômico previsto de crescimento das mercadorias transportadas. De posse das projeções das vendas de veículos pesados no horizonte 2050 e assumindo que o perfil de sucateamento dos veículos permanecerá constante ao longo do período de análise, pode-se determinar a frota de veículos pesados.

No cenário BC+I, considera-se que, a partir de 2020, 1% das vendas dos caminhões médios, semi-pesados e pesados será com tecnologia híbrida hidráulica (HHV). Esse percentual crescerá de forma linear até atingir 25% das vendas em 2050. A Figura 146 exibe o crescimento da frota de veículos pesados por tecnologia veicular no horizonte 2050.

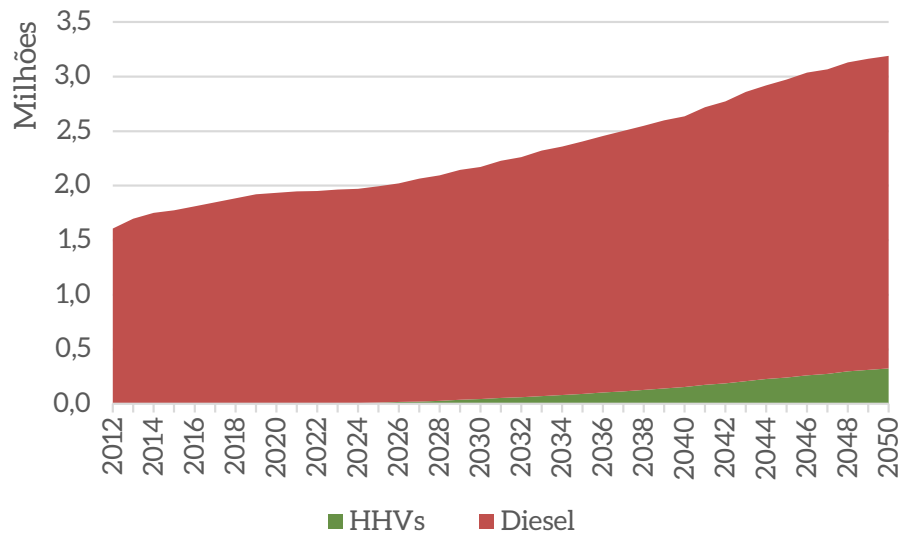


Figura 146 – Frota de Caminhões – Cenário Inovação

Fonte: Elaboração própria

Dessa forma, o cenário prevê que a frota total de caminhões alcançará a marca de 3,2 milhões de veículos em 2050, dos quais 325 mil usarão tecnologia híbrida hidráulica. Destaca-se que o cenário BC+I considera também outras inserções tecnológicas que permitirão a redução do consumo específico dos veículos, como as previstas no cenário BC: melhorias aerodinâmicas, redução de massa, avanços no sistema de motorização diesel, entre outras. Portanto, trata-se de um cenário em que se consideram opções inovadoras aditivas às tecnologias de baixo carbono comercialmente disponíveis.

7.4 PREMISSAS DO MODAL FERROVIÁRIO

7.4.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

Para o transporte de passageiros, de forma similar a Brasil/EPE (2014b) e ao cenário BC, são considerados investimentos na ampliação dos sistemas sobre trilhos de alta e média capacidade, como metrô, trens urbanos, veículos leves sobre trilhos (VLT) e monotrilhos, e melhorias na qualidade e na capacidade de transporte dos sistemas já em operação. Também é esperado que o transporte interurbano de passageiros pelo modal ferroviário cresça em função da implantação dos TAV e dos trens regionais que ligam cidades próximas.

No entanto, a principal característica do cenário BC+I é a consideração do uso de levitação magnética para os TAV a serem construídos no país. Projeta-se, a partir de 2030, a construção de duas linhas de TAV ligando Rio de Janeiro a São Paulo e Belo Horizonte a Curitiba com a tecnologia de levitação magnética. Neste estudo, considera-se que o aumento do pkm transportado por essa tecnologia seria migrado do transporte aéreo. Ou seja, assume-se que o incremento de pkm do modal, em relação ao cenário BC, decorre da construção das linhas de TAV, que reduzirão a movimentação aérea na mesma proporção.

Assim, estima-se um crescimento acumulado de 750% até 2050, com o total de passageiros-quilômetro passando de 28 bilhões/ano, em 2012, para 238 bilhões/ano, em 2050. A Tabela 127 mostra as estimativas do indicador de atividade desse segmento para o Brasil no referido cenário em comparação com o cenário BC. Destaca-se, novamente, que o aumento da atividade do segmento ferroviário de passageiros no cenário, fruto da construção dos TAV, se dá com a redução da atividade do segmento aéreo de passageiros.

Tabela 127 – Evolução PKM Ferroviário nos Cenários BC e BC+I

Ano	2013	2020	2030	2040	2050
pkm metroviário (10 ⁹) – BC	28	31	75	130	165
pkm metroviário + TAV (10 ⁹) – BC+I	28	31	90	165	235

Fonte: Elaboração própria

7.5.1 TRANSPORTE DE CARGA

Para a modelagem da carga transportada e o consumo para o modal ferroviário, é necessária a adoção de algumas premissas que servem de base para a simulação. As principais informações para a projeção do cenário BC+I seguem como base as características do cenário BC, não havendo alterações nas variáveis de base da simulação desse modal.

7.5 PREMISSAS DO MODAL AÉREO

7.5.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

De forma similar ao transporte ferroviário de carga, o transporte aéreo de passageiros não prevê alterações das variáveis de base de simulação em relação ao cenário BC. O único aspecto considerado no cenário é a redução da demanda de voos nacionais, a partir de 2030, em função da construção dos TAV no país, conforme apresentado na Tabela 128.

Tabela 128 – Redução PKM Aéreo do Cenário BC em Relação ao Cenário BC+I

Ano	2013	2020	2030	2040	2050
Redução pkm aéreo (10 ⁹)	0	0	15	35	70

Fonte: Elaboração própria

7.5.2 TRANSPORTE DE CARGA

Quanto ao transporte aéreo de carga, para projeção do número de toneladas-quilômetro transportadas (TKU), adota-se como premissa que esse indicador seria função da dinâmica do comércio internacional de exportações e importações. O cenário considera também a entrada de aviões solares exclusivamente para o transporte de mercadorias, permitindo a redução da intensidade energética do modal de 40,7 litros por tonelada-quilômetro transportada, em 2012, para 35,9 litros por tonelada-quilômetro transportada, em 2050, refletindo um ganho de 6% de eficiência no período. Por sua vez, no cenário BC, esse parâmetro alcança o patamar de 38,6 litros por tonelada-quilômetro transportada, em 2050.

7.6 PREMISSAS DO MODAL HIDROVIÁRIO

7.6.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

O transporte de passageiros do modal hidroviário não apresenta alteração no cenário BC, sendo mantidas as mesmas premissas e hipóteses para a evolução das variáveis-chave no horizonte 2050.

7.6.2 TRANSPORTE DE CARGA

Para o cálculo da tonelada-quilômetro útil transportada e a obtenção do volume de combustível demandado no cenário de inovação, são utilizadas as mesmas premissas que constam para o cenário BC. O consumo específico inicial do cenário de inovação, por sua vez, segue a evolução histórica do setor, de modo que na projeção possam se atribuir ganhos de eficiência de caráter tecnológico oriundos da maior penetração do sistema de *towing kite*. Para navios petroleiros e graneleiros, a tecnologia avançada alcança 80% da frota de renovação, enquanto, para porta-contêineres e navios de cargas em geral, a penetração chega a 50%. Isso reflete em redução do consumo específico, durante o horizonte de estudo, de aproximadamente 1,3% ao ano, enquanto no cenário BC essa redução era de 1% ao ano.

7.7 PROJEÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE GEE

Nesta seção, são apresentadas as projeções de consumo energético e das emissões de GEE no setor de transportes no Brasil, para o período de 2013 a 2050, relativas ao cenário BC+I.

Esse cenário considera as premissas gerais do cenário BC, com a entrada de seis tecnologias inovadoras para o setor. Ou seja, trata-se de um cenário aditivo ao potencial de mitigação considerado no cenário BC, no qual se considera o papel de tecnologias de ruptura com vistas a promover o abatimento de emissões de GEE.

A entrada das tecnologias nos diferentes modais permite a redução do consumo da maioria dos combustíveis utilizados no setor (com exceção de eletricidade e hidrogênio), em comparação com o cenário BC, como apresentado na Tabela 129 e na Figura 147. O consumo energético total do setor atinge, em 2050, o valor de aproximadamente 101 milhões de tep, que é 36% inferior ao cenário REF, e 9% inferior ao cenário BC. Destaca-se que, apesar da entrada de ônibus a etanol no horizonte de análise, o consumo desse combustível é inferior ao cenário BC em função da menor participação nas vendas de veículos flexíveis, devido à entrada de veículos a hidrogênio. A eletricidade aumenta sua participação na matriz em função do maior uso de transporte ferroviário de passageiros a partir de trens de levitação magnética.

Tabela 129 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Combustível (mil tep)

Ano	2013	2020	2030	2040	2050
Óleo diesel	41.246	46.755	42.424	43.775	43.795
Biodiesel	3.074	5.141	10.450	10.745	10.730
Álcool etílico anidro	5.237	6.166	6.039	4.591	3.275
Álcool etílico hidratado	6.803	13.921	18.616	16.235	12.310
Gasolina automotiva	19.909	23.440	22.958	17.454	12.450
Gás natural veicular	1.340	1.656	1.103	490	136
Querosene de aviação	5.949	8.965	12.702	13.681	11.918
Biojet	0	0	0	0	37
Óleo combustível	1.139	1.479	1.715	1.970	2.032
Eletricidade	162	188	656	1.817	3.325
Hidrogênio	0	0	0	389	680
Total	84.861	107.711	116.662	111.148	100.687

Fonte: Elaboração própria

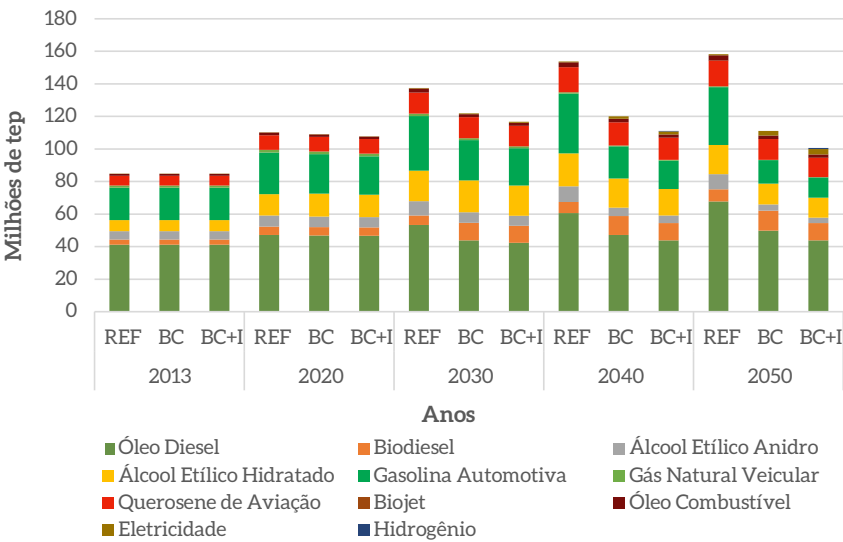


Figura 147 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Combustível

Fonte: Elaboração própria

Do ponto de vista dos modos de transporte, o modal rodoviário permanece como o segmento mais representativo do setor de transportes, como exibido na Tabela 130 e na Figura 148. Entretanto, esse modal sofre redução de 9% em relação ao cenário BC como consequência do uso de veículos a hidrogênio, que apresentam maior eficiência de conversão de energia final. Os modais hidroviário e aéreo sofrem reduções semelhantes de 7%, em 2050, em relação ao mesmo cenário, devido ao uso das embarcações com *towing kite* e dos aviões solares. No caso do modal aéreo, há ainda redução da atividade do setor por conta do maior transporte de passageiros por TAV, o que gera aumento de consumo do modal ferroviário de 15%, em 2050, em comparação com o cenário BC.

Tabela 130 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Modal (mil tep)

Modal	2013	2020	2030	2040	2050
Rodoviário	75.835	95.128	99.540	91.383	80.823
Ferrovário	1.418	1.529	1.953	3.188	4.874
Hidroviário	1.658	2.089	2.468	2.895	3.037
Aéreo	5.949	8.965	12.702	13.681	11.953
Total	84.861	107.711	116.662	111.148	100.687

Fonte: Elaboração própria

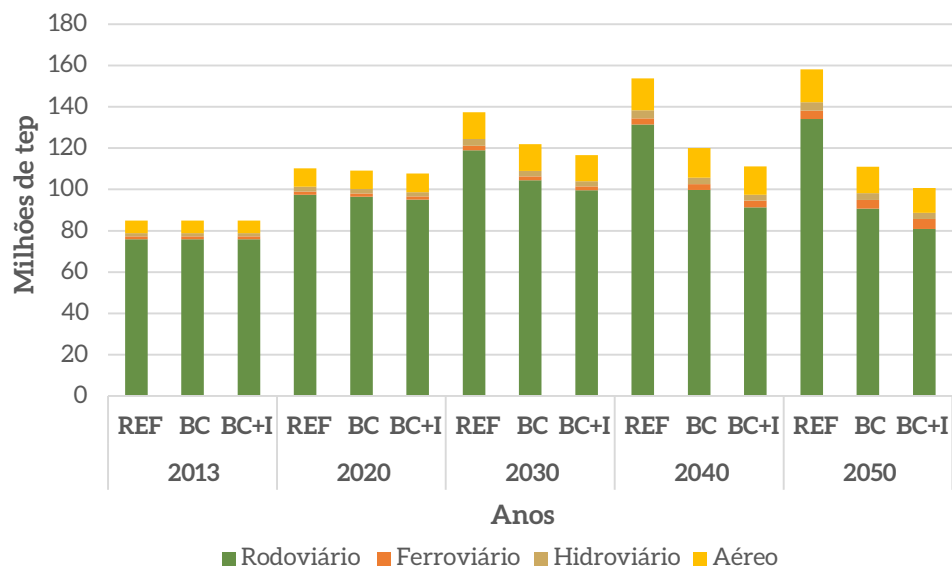


Figura 148 – Consumo Energético no Setor de Transportes por Modal – Inovação

Fonte: Elaboração própria

Quanto às emissões de GEE, a Tabela 131 e a Figura 149 exibem as emissões totais de CO₂, CH₄ e N₂O para o setor no horizonte 2050. Verifica-se que, nesse cenário, as emissões totais em 2050 são reduzidas em 41% em relação ao cenário REF, e 9% em comparação com o cenário BC.

Tabela 131 – Emissão de Gases de Efeito Estufa por Modal (GgCO₂eq)

Modal	2013	2020	2030	2040	2050
Rodoviário	184.368	212.352	201.971	186.949	168.612
Ferroviário	3.605	3.725	3.219	4.899	7.289
Hidroviário	5.255	6.626	7.822	9.171	9.618
Aéreo	17.631	26.570	37.645	40.548	35.322
Total	210.859	249.273	250.658	241.567	220.841

Fonte: Elaboração própria

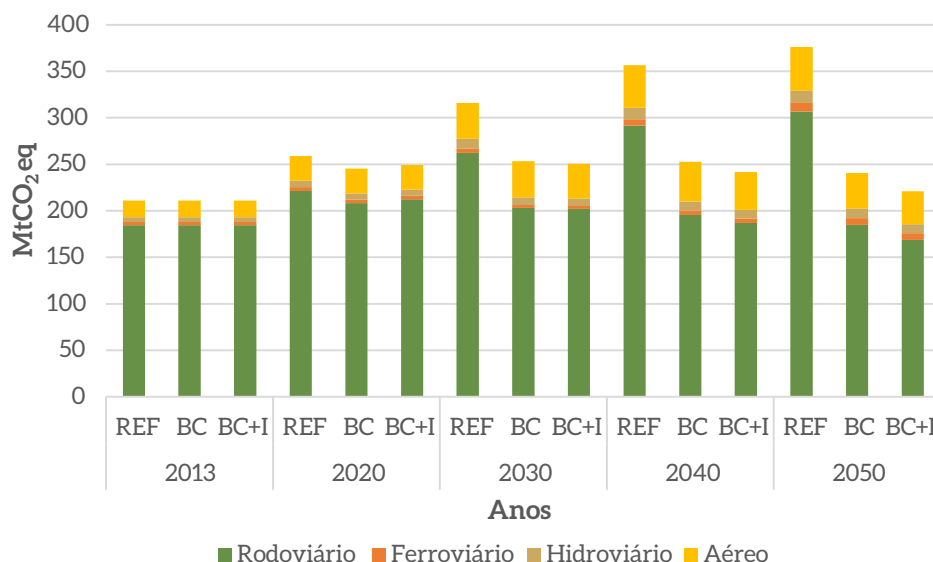


Figura 149 – Emissão de Gases de Efeito Estufa por Modal – Inovação

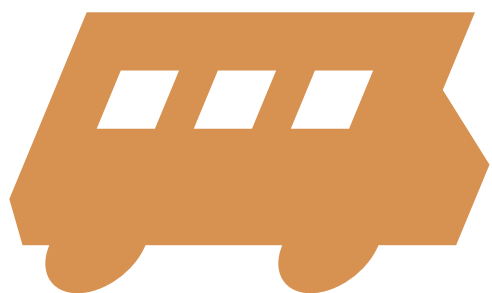
Fonte: Elaboração própria

7.7.1 TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

Para o transporte de passageiros, o efeito atividade dos modais rodoviário e hidroviário se mantém igual ao cenário BC, tendo em vista que não foram consideradas mudanças estruturais nesses modais, mas somente a entrada de tecnologias mais eficientes e com maior custo de implementação. Para o caso do modal aéreo, houve a consideração de redução da atividade do setor como consequência da entrada de TAV. Tal consideração levou a migração de 70 bilhões de pkm, em 2050, do modal aéreo para o modal ferroviário, em comparação com o cenário BC. Esse feito aumentou a participação do ferroviário na matriz para 5% e reduziu a participação do aéreo para 18% em 2050 (no cenário BC esses valores eram de 3% e 20%, respectivamente).

7.7.2 TRANSPORTE DE CARGA

Com relação ao transporte de carga, uma vez que não se considerou a opção de migração modal nesse cenário, os valores obtidos são os mesmos dos encontrados no cenário BC.



Subsídios para a formulação de instrumentos de política pública com vistas ao abatimento de emissões de GEE pelo setor de transportes

Capítulo

8

8 SUBSÍDIOS PARA A FORMULAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE POLÍTICA PÚBLICA COM VISTAS AO ABATIMENTO DE EMISSÕES DE GEE PELO SETOR DE TRANSPORTES

Este capítulo objetiva fornecer subsídios para a formulação de instrumentos de política pública capazes de remover barreiras e potencializar cobenefícios associados à adoção dos cenários de baixo carbono (BC e BC+I), com vistas a mitigar emissões de GEE no setor de transportes.

O cenário BC elencou um grupo de tecnologias responsáveis por um potencial de abatimento da ordem de 2,0 bilhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente até 2050, o que representaria emissão total 36% menor em 2050. As medidas são apresentadas na Tabela 132 com os respectivos potenciais de abatimento e custos associados. Cumpre destacar que o cenário BC+I não é avaliado em termos de custos de abatimento em função da inexistência de parâmetros econômicos necessários para a sua mensuração, como custos de capital e custos de operação e manutenção. Em termos de potencial de mitigação de emissões de GEE, verificou-se que a sua implementação resultaria em emissões 41% menores em 2050.

Pode-se constatar que grande parte das atividades de baixo carbono tem custos de abatimento positivos, o que indica barreiras econômicas à sua adoção, posto que inexiste precificação de carbono no país. Mais que isso, medidas com custos de abatimento negativos, como é o caso de ações de eficiência de ônibus e micro-ônibus, enfrentam barreiras à implementação, como desconhecimento dos benefícios econômicos e ambientais da medida, acesso a crédito para a realização de investimentos, entre outras. Esses aspectos exigem a formulação de instrumentos de política pública para remover barreiras à adoção da medida, o que potencializaria a eficácia de políticas de mitigação de emissões de GEE junto ao setor de transportes. Para mapear esses aspectos de natureza qualitativa, com o objetivo de fornecer elementos para que os formuladores de política pública possam implementar, efetivamente, políticas de baixo carbono junto ao setor, serão discutidos os seguintes tópicos neste capítulo:

- i) Identificação de barreiras e cobenefícios e experiências internacionais e nacional de políticas públicas para a adoção de atividades de baixo carbono no setor;
- ii) Subsídios para a formulação de instrumentos de política pública aplicáveis setorialmente para promover o abatimento de emissões de GEE;
- iii) Síntese dos subsídios para a formulação de instrumentos de política pública visando à implementação de cenários de baixo carbono.

Tabela 132 – Medidas, Potenciais e Custos de Abatimento no Setor de Transportes

Modal	Perfil	Tecnologias	Custo à Taxa de 8% (US\$/tCO ₂)	Custo à Taxa de 12% (US\$/tCO ₂)	Potencial de Abatimento (MtCO ₂)	Custo Total à Taxa de 8% (US\$ milhões)	Custo Total à Taxa de 12% (US\$ milhões)
Rodoviário	Carga	Caminhão semileve	272,90	133,82	1,90	518,27	254,13
		Caminhão leve	142,04	69,11	26,62	3.780,61	1.839,35
		Caminhão médio	102,27	48,92	19,55	1.999,07	956,24
		Caminhão semipesado	68,94	32,44	119,50	8.237,79	3.876,04
		Caminhão pesado	68,39	32,13	124,10	8.487,04	3.986,94
	Passageiro	Automóveis a gasolina mais eficientes	17,07	11,57	11,40	194,63	131,94
		Automóveis flex mais eficientes	20,74	22,12	110,48	2.291,70	2.443,94
		Automóveis híbridos	441,98	205,53	208,07	91.962,27	42.764,86
		Automóveis plug-in flex	502,55	181,13	68,80	34.575,09	12.461,46
		Automóveis a bateria	296,13	106,90	105,27	31.174,13	11.253,21
		Comerciais leves a gasolina mais eficientes	11,84	7,93	17,05	201,81	135,20
		Comerciais leves flex mais eficientes	3,55	5,70	42,27	150,24	241,11
		Comerciais leves a diesel mais eficientes	22,19	11,00	46,36	1.028,52	509,90
		Motocicletas a gasolina mais eficientes	52,41	26,39	11,05	579,03	291,61
		Motocicletas flex mais eficientes	106,88	51,83	5,72	611,32	296,45
		Ônibus urbano mais eficiente	-36,68	-14,12	91,46	-3.354,86	-1.291,03
		Micro-ônibus mais eficientes	-31,06	-11,73	15,84	-492,12	-185,77
		Ônibus rodoviários mais eficientes	-36,82	-13,98	15,25	-561,58	-213,17

Modal	Perfil	Tecnologias	Custo à Taxa de 8% (US\$/tCO ₂)	Custo à Taxa de 12% (US\$/tCO ₂)	Potencial de Abatimento (MtCO ₂)	Custo Total à Taxa de 8% (US\$ milhões)	Custo Total à Taxa de 12% (US\$ milhões)
Ferroviário		Trens mais eficientes	38,33	21,39	52,64	2.017,57	1.126,08
Aquaviário	Hidroviário (óleo diesel)	Embarcações mais eficientes	39,82	26,30	14,76	587,97	388,32
	Cabotagem (óleo combustível)	Embarcações mais eficientes	16,52	10,88	59,64	984,98	649,09
Aéreo		Aeronaves mais eficientes	1,54	0,85	78,37	120,46	66,93
Mudança modal	Passageiro	Automóveis --> ônibus urbanos e metrô	0,07	0,02	664,85	44,29	15,16
	Carga	Rodoviário --> ferroviário e hidroviário	126,28	59,58	141,29	17.843,07	8.418,07

Fonte: Elaboração própria

8.1 COBENEFÍCIOS, BARREIRAS E AS EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS E NACIONAL NA ADOÇÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS DE BAIXO CARBONO PARA O SETOR DE TRANSPORTES

Para melhor discutir o tema, as políticas são divididas em três grupos: políticas de eficiência energética, políticas de estímulo à mudança modal e políticas para incentivo de maior uso aos biocombustíveis. Para cada grupo de políticas, são apontados barreiras e cobenefícios da/à implementação e, à luz de experiências internacionais e nacionais, são apontadas formas de superá-las que permitiriam atingir os benefícios diretos e indiretos das medidas de baixo carbono mapeadas. Destaca-se que, diante da importância do modal rodoviário no consumo e emissão do setor, as principais políticas públicas são voltadas para esse modal.

8.1.1 COBENEFÍCIOS, BARREIRAS E AS EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS E NACIONAL ASSOCIADA A POLÍTICAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Segundo a IEA (2012c), economias significativas de combustível podem ser alcançadas por meio de tecnologias atualmente disponíveis, porém ainda não difundidas em larga escala. Na opinião dos autores, a intervenção pública nessa temática é justificável, pois os benefícios de veículos mais eficientes para a sociedade⁴⁷ superam expressivamente seus custos de implementação. Mesmo no nível

⁴⁷ Benefícios à sociedade incluem mitigação das mudanças climáticas, economia de combustíveis, segurança energética, menor emissão de poluentes, entre outros.

individual, um maior custo relacionado a tecnologias eficientes é, em geral, facilmente compensado pelas economias decorrentes do menor consumo de combustível. Ou seja, medidas de eficiência energética tipicamente apresentam custos marginais de abatimento negativos.

Mais do que isso, há cobenefícios oriundos de transformações na matriz de transporte no sentido da efficientização dos modais que perpassam a economia de combustíveis. Podem-se alcançar melhorias na segurança energética nacional, o que passa pela redução da dependência de petróleo, bem como redução de custos operacionais no setor (basicamente, combustíveis) e maior propagação tecnológica. Em termos sociais e ambientais, há benefícios à saúde pública dada a redução de poluentes atmosféricos, maior segurança nas ruas dada a redução de acidentes e benefícios ao ecossistema e biodiversidade dada a redução da poluição do ar.

Entretanto, barreiras sob a forma de falhas comportamentais e de mercado se traduzem em menor demanda por veículos eficientes (IEA, 2012c). Compreender a necessidade de regular em favor da eficiência energética veicular envolve compreender as falhas associadas à demanda por veículos eficientes. Nesse sentido, as barreiras existentes no setor de transportes vão desde o lobby da indústria automobilística convencional a favor do contínuo uso de derivados de petróleo até a existência de uma oposição ao aumento de custos, muitas vezes sentido por meio de barreiras tarifárias na aquisição de equipamentos no exterior, tendo em vista a implementação de medidas incrementais nos modais. Mais especificamente, há barreiras estruturais, como a falta de infraestrutura para veículos elétricos (postos de recarga padronizados) e também o *lock-in* da infraestrutura rodoviária, que desestimula o transporte por outros modais. Há também barreiras econômicas quando se trata do transporte de carga, como a existência de subsídios ao óleo diesel, desestimulando investimentos em novas tecnologias. Cabe ressaltar que determinados recursos minerais se apresentam insustentáveis para o crescimento de tecnologias como baterias e células a combustível, reforçando o *lock-in* tecnológico da indústria, principalmente automobilística, como fator dificultador de maiores transformações no setor.

Falhas de mercado ocorrem quando uma ou mais condições necessárias para que um mercado opere de forma eficiente não é/são atingida(s). No contexto da eficiência veicular, isso significa que uma quantidade maior de combustível é consumida para percorrer uma dada distância do que seria justificado por uma alocação racional de recursos. Falhas comportamentais são aquelas que comprometem a racionalidade dos atores, levando-os a escolhas subótimas para a sociedade (IEA, 2012c).

Uma primeira falha de mercado no mercado de veículos eficientes é informacional. É possível que não haja informações suficientes a respeito da eficiência ou que, ainda que haja informação disponível, os consumidores não compreendam plenamente os benefícios de veículos eficientes. O IPCC (2014) destaca a possibilidade de haver excesso de informação, o que poderia confundir compradores. Além disso, poucos consumidores buscam minimizar o custo do ciclo de vida do veículo⁴⁸ ao realizar a compra (IPCC, 2014), o que seria uma falha comportamental.

Em segundo lugar, consumidores podem ter pouco incentivo para comprar veículos eficientes se o preço dos combustíveis for mantido artificialmente baixo, e pode ser difícil realizar uma análise de fluxo de caixa que incorpore o preço dos combustíveis devido à incerteza associada ao preço do petróleo (IEA, 2012c). Outra falha de mercado é uma externalidade associada à apropriação dos custos e benefícios da eficiência: as montadoras arcam com o custo do desenvolvimento de tecnologias

48 Em uma análise de custo do ciclo de vida, seriam calculados todos os custos incorridos durante o uso do veículo, incluídos gastos com aquisição, manutenção, combustível, seguro etc.

e os consumidores e a sociedade usufruem da maior parte dos benefícios da eficiência sob a forma de economia de gastos com combustíveis (essa questão é chamada de *split incentives*, ou incentivos dispersos, em tradução livre). Embora, a princípio, as montadoras possam repassar os custos de desenvolvimento tecnológico ao consumidor, pode não ser interessante fazê-lo, especialmente se os consumidores não derem o valor adequado a veículos eficientes (IEA, 2012c). Há evidências, por exemplo, de que alguns consumidores não estariam dispostos a pagar por tecnologias de eficiência veicular ainda que isso represente uma economia de combustível (IEA, 2012c) – em outras palavras, ao avaliar o custo de aquisição do veículo, consumidores podem utilizar taxas de desconto muito elevadas, o que reduz a importância de economias financeiras em prazos mais longos (como aquelas advindas da economia de combustível) e desloca o foco da análise ao custo de aquisição (o preço do carro, propriamente dito). Tal fato seria uma falha comportamental.

Caberia, portanto, ao Estado a responsabilidade de incentivar o desenvolvimento e a adoção de tecnologias voltadas à eficiência veicular. Segundo a IEA (2012c), para contornar tais falhas, os três principais componentes que deveriam ser considerados em uma política integrada de eficiência energética veicular são:

- i) Medidas informacionais, como etiquetagem veicular e outras medidas de conscientização dos consumidores;
- ii) Padrões de eficiência energética veicular;
- iii) Medidas fiscais, como incentivos tributários a veículos eficientes, taxaço de combustível e taxas de uso de veículos.

Um elemento comum a todas as medidas é a necessidade da medição do desempenho dos veículos, seja para que os resultados possam ser divulgados para averiguar que os padrões estão sendo cumpridos, seja para que os veículos ineficientes sejam taxados (IEA, 2012c). O Quadro 17 apresenta os objetivos, resultados esperados e questões associadas à implantação de cada um desses grupos de medidas. Nas seções que seguem, cada uma das tipologias é tratada em maior detalhe.

Quadro 17 – Características de Diferentes Tipos de Políticas de Eficiência Veicular

Tipo de Medida	Objetivo(s)	Resultados	Implementação
Medidas informacionais (etiquetagem)	Superar a falha informacional e divulgar a eficiência veicular.	Permite a compra de veículos mais eficientes.	Implementação e resultados rápidos.
Padrões de eficiência veicular	Contornar a falha de mercado em que consumidores dão pouco valor à eficiência veicular.	Fornecer um nível mínimo de eficiência aos veículos vendidos.	Maior planejamento e tempo são necessários. Fornece metas de longo prazo aos fabricantes
Medidas fiscais	Fazer com que consumidores deem maior valor à eficiência veicular. Fornecer incentivos à compra de veículos eficientes.	Taxação de combustíveis estimula o uso de veículos eficientes. Maior incentivo a aquisição de veículos eficientes que aquele alcançado por meio de padrões.	É possível obter resultados rapidamente, porém pode ser difícil mantê-los no longo prazo.

Fonte: Adaptado de IEA, (2012c)

8.1.1.1 MEDIDAS INFORMACIONAIS

O desenvolvimento de métodos padronizados para medir a eficiência energética dos veículos é um elemento essencial a qualquer política de eficiência veicular, seja qual for a forma da política elaborada. Uma etapa posterior à medição é a divulgação dos resultados, que pode ser realizada sob diferentes formatos. Em geral, o principal formato utilizado é a etiquetagem veicular, em que etiquetas propriamente ditas são fixadas aos veículos vendidos. Segundo Mahlia et al. (2013), os principais benefícios da implementação de um sistema de etiquetagem são:

- i)** Permite que consumidores obtenham mais informações a respeito da eficiência dos veículos;
- ii)** Ajuda consumidores a escolherem veículos mais eficientes;
- iii)** Pode levar a uma transformação do mercado em direção a veículos mais eficientes;
- iv)** Motiva fabricantes a produzirem veículos mais eficientes.

A etiquetagem pode ser realizada sob diferentes formas, dependendo do foco dado pelo programa. Até o momento, três abordagens têm sido adotadas na etiquetagem veicular (IEA, 2012c):

- 1)** Classificação gráfica (*e.g.* de A a E);
- 2)** Comunicação direta da eficiência do veículo;
- 3)** Divulgação da eficiência do veículo em relação a um padrão ou a uma média.

Cada uma dessas abordagens tem vantagens e desvantagens. Por exemplo, um sistema gráfico de comparação pode atrair a atenção do consumidor e incorporar a eficiência veicular à sua escolha no momento da compra. Por outro lado, a classificação do veículo pode ser controversa, especialmente se for dividida em diferentes categorias. Em casos nos quais a classificação é segmentada por um atributo do veículo (tal como a massa do veículo ou sua área projetada no solo), veículos menos eficientes podem receber melhor classificação por causa de características alheias à eficiência veicular (IEA, 2012c).

A comunicação direta da eficiência do veículo incentiva os consumidores a incorporar essa variável ao adquirir o carro, especialmente se divulgada em conjunto com informações palpáveis, como a economia de combustível. Contudo, como pode haver disparidade entre o consumo de combustível nas condições de medição e o consumo observado em situações reais, os consumidores podem ser levados ao erro. Por esse motivo, governos que utilizem esse tipo de etiqueta devem procurar retratar o mais fielmente possível as condições reais de trânsito em seus testes de medição. Outra possível desvantagem dessa abordagem é que, na falta de informações mais visuais, os consumidores podem ignorar a etiqueta (IEA, 2012c).

Uma abordagem mais simples é adotada no Japão, em que apenas os veículos com performance acima da média para sua classe de veículo recebem a etiqueta, a qual informa o percentual em que o automóvel supera a média. Esse tipo de etiqueta informa de forma simples que o veículo é mais eficiente que a média, porém não fornece informações detalhadas a respeito do seu consumo de combustível (IEA, 2012c).

8.1.1.2 PADRÕES DE EFICIÊNCIA VEICULAR

Padrões de eficiência veicular tipicamente definem um limite máximo legal de consumo de combustível (ou energia, ou emissões de CO₂ etc.) por quilômetro percorrido pelo veículo em um determinado ciclo de teste.

Geralmente, a eficiência veicular não tem sido regulada da mesma forma que outros equipamentos em que a eficiência é definida como um mínimo a ser atingido que todo aparelho, individualmente, deve alcançar. Como a eficiência do veículo depende de características específicas do veículo, como aerodinâmica, peso, características do motor e outras, a maioria das políticas existentes é baseada em uma média da frota vendida por cada empresa (IEA, 2012c).⁴⁹ Dessa forma, as montadoras têm maior flexibilidade para atender às metas, pois podem aumentar significativamente a eficiência de um grupo menor de veículos ou melhorar a eficiência de sua frota como um todo em menores valores.

O estabelecimento de padrões de eficiência veicular trata de algumas das falhas de mercado mencionadas anteriormente, como incentivos cruzados (*split incentives*) e uso de altas taxas de desconto por consumidores de veículos, pois todos os fabricantes são legalmente obrigados a atender o nível de eficiência determinado (IEA, 2012c). Para Mahlia et al. (2013), os principais objetivos de um padrão de eficiência veicular são:

- i) Proibir que veículos ineficientes entrem no mercado;
- ii) Aumentar a eficiência de novos veículos e reduzir suas emissões;
- iii) Incentivar a adoção de tecnologias mais eficientes;
- iv) Influenciar os fabricantes locais a produzir gradualmente veículos mais eficientes.

IEA (2012c) levanta dois principais grupos de abordagens para a definição de um padrão de eficiência veicular, os quais são subdivididos em dois grupos adicionais:

- Meta baseada em atributos: aplicável a todos os veículos de cada empresa, em que a meta varia em função de uma dada característica (peso, tamanho etc.) dos veículos vendidos pela empresa. As duas formas possíveis de alinhar as médias com os atributos do veículo são:
 - » Curva contínua: metas são estimadas em função de uma curva contínua definida pelo atributo do veículo. Para que um fabricante verifique se está cumprindo a meta, ele deve calcular a média de peso de seus veículos, ponderada pelas vendas, e então checar se a média de suas emissões (também ponderada pelas vendas) está abaixo da curva (caso estivesse sendo tratada a quilometragem por litro de combustível, a relação seria inversa: o fabricante deveria estar acima da linha, pois assim percorreria maior distância com a mesma quantidade de combustível e seria mais eficiente). Nessa modalidade, a inclinação da curva é um fator fundamental para determinar se há incentivo à venda de veículos mais pesados. Uma curva relativamente plana (baixo coeficiente angular) significa que veículos pesados não são favorecidos (IEA, 2012c) – dado que veículos mais pesados tendem a ter maior dificuldade para cumprir suas metas, se a curva for pouco inclinada, eles têm uma margem pequena para aumentar seu consumo específico de combustível e ainda cumprir a meta.

⁴⁹ Uma exceção é a política chinesa, em que há metas por categoria e nenhum veículo pode deixar de atender à meta (MAHLIA; TOHNO; TEZUKA, 2011).

- » Metas por categoria: veículos são separados em categorias discretas definidas pelos atributos e há um padrão diferente para cada categoria. Nesse caso, ao avaliar se uma empresa cumpriu a meta, não é realizada uma média para todos os veículos da montadora, e sim médias por categoria. Essa modalidade se assemelha a uma curva discretizada, entretanto a existência de degraus pode gerar algumas distorções.
- Meta uniforme (não baseada em atributos): aplicável a todos os veículos e a todas as empresas independentemente de qualquer característica do automóvel. Esse valor pode ser definido de duas formas:
 - » Absoluta: impõe o mesmo valor de meta para todas as empresas, as quais devem aumentar a eficiência de seus veículos até a meta-alvo (definida, por exemplo, em km/l, g CO₂/km, MJ/km, milhas por galão e outros);
 - » Melhoria de eficiência: todas as empresas devem obter uma melhoria de eficiência, em porcentagem, em relação a uma data-base. Cada empresa tem uma meta absoluta diferente, que será função da eficiência de sua frota vendida na data-base e da melhoria de eficiência determinada pela política.

Como seria de se esperar, cada formato de padrão pode ser considerado vantajoso sob determinados aspectos e desvantajoso sob outros. Com uma meta absoluta uniforme, fabricantes de veículos mais pesados terão mais dificuldade em atingi-la, já que veículos mais pesados tendem a ser mais ineficientes. Entretanto, dessa forma, se cumpridas as metas, há a certeza de que a eficiência média da frota foi aumentada (IEA, 2012c). De maneira semelhante, uma meta uniforme de melhoria de eficiência também garante avanços para todas as montadoras, independentemente de seu ponto de partida ou segmento de mercado que ocupe. Por outro lado, empresas que já tenham realizado esforços para aumentar a eficiência de sua frota são penalizadas, porque terão de gastar recursos adicionais (possivelmente a custos marginais maiores) para aumentar ainda mais seus veículos. Além disso, haveria o desafio de estabelecer metas para novos entrantes no mercado (IEA, 2012c).

Sob a ótica das montadoras, sistemas baseados em atributos podem ser mais justos, pois não prejudicam aqueles que ocupam segmentos específicos do mercado. Independentemente do tamanho, peso ou potência dos veículos fabricados pela empresa, os esforços a serem empreendidos tendem a ser semelhantes, com custos semelhantes. Apesar disso, há um defeito fundamental nesse tipo de regulação: mesmo com o padrão, a eficiência média de novos veículos pode aumentar se as vendas migrarem para veículos maiores ou mais pesados (IEA, 2012c). Pode haver, ainda, incentivo à fabricação de veículos mais pesados, de modo a aproveitar-se de metas menos rigorosas (essa desvantagem, porém, pode ser controlada se a inclinação da curva que define as metas for adequadamente definida – seja a curva contínua ou discretizada por categorias). À exceção de a curva contínua permitir maior flexibilidade às montadoras e, possivelmente, menos distorções, há poucas diferenças entre a modalidade de curva contínua e por categorias (IEA, 2012c). O Quadro 18 apresenta uma comparação entre as diferentes modalidades de padrão.

Quadro 18 – Comparação entre Diferentes Formatos de Padrões de Eficiência Veicular

	Baseada em atributos		Meta uniforme	
	Curva contínua	Por categorias	Absoluta	Melhoria de eficiência
Garantia de melhoria de eficiência da frota	Certa	Certa	Incerta (mudanças nas características dos veículos podem piorar a eficiência média da frota)	Incerta (mudanças nas características dos veículos podem piorar a eficiência média da frota)
Justo com as montadoras?	Injusto (determinados segmentos de mercado terão maior dificuldade)	Injusto (desconsidera esforços anteriores das empresas em aumentar a eficiência)	Justo	Relativamente justo (dependendo da definição das categorias)
Flexibilidade das montadoras para atender à meta	Boa	Boa	Boa	Potencialmente limitada (dependendo da definição das categorias)

Fonte: Elaboração própria a partir de IEA, 2012c

Talvez um dos pontos mais críticos do estabelecimento de um padrão de eficiência veicular seja a definição da meta a ser atingida, seja lá qual for o formato adotado para a meta. Se a meta for muito rigorosa, algumas empresas podem enfrentar custos muito altos, o que pode reduzir sua competitividade e causar perdas de empregos. Isso é particularmente possível caso os consumidores não deem o devido valor a tecnologias eficientes e se a maior parte dos custos incrementais dessas tecnologias for absorvida pelas empresas (IEA, 2012c). Na opinião da IEA (2012c), idealmente, os custos das tecnologias eficientes deveriam ser integralmente repassados aos consumidores, pois eles seriam “ressarcidos” sob a forma de economia de combustível ao longo da vida útil do veículo. Ao contrário, se a meta for muito baixa, a segurança energética fica prejudicada e os objetivos ambientais não serão atingidos.

8.1.1.3 MEDIDAS FISCAIS

Medidas fiscais são aquelas que envolvem taxaço ou subsídios sobre o veículo, sobre o combustível ou sobre o uso do veículo (e.g. pedágios urbanos, licenciamento anual). A maior parte dos países exige que taxas sejam pagas por proprietários de veículos, seja anualmente ou no momento de sua aquisição (IEA, 2012c).

Taxas sobre os veículos podem ser combinadas com metas energéticas de forma que veículos eficientes tornem-se fiscalmente mais atraentes (ou seja, menos taxados ou mais subsidiados que os demais), incentivando consumidores a demandar esses veículos e encorajando fabricantes a aumentar a eficiência de suas frotas. Uma importante vantagem de sistemas de taxaço de veículos é que são relativamente simples de adotar (especialmente se já houver alguma taxaço sobre veículos), e isso pode ser feito sem envolver custos adicionais ao Estado se a taxaço for adequadamente implementada (IEA, 2012c).

Historicamente, taxações sobre veículos têm sido aplicadas com base em características técnicas, como potência, peso etc. (IEA, 2012c), e seria possível adequar tais taxas para que fossem diretamente voltadas para a eficiência energética. Em alguns casos, a taxa de veículos ineficientes é combinada a um abatimento de impostos sobre veículos ineficientes, mecanismo chamado de *feebate*.⁵⁰ Na maioria dos casos, o objetivo é manter a medida neutra em termos de receitas e custos, de forma que o orçamento público não perca arrecadação nem se imputam custos adicionais à sociedade (ICCT, 2010). Para que esse objetivo seja atingido, o sistema de taxa e abatimento deve ser cuidadosamente dimensionado pelo formulador da política.

Feebates podem ser projetados sob a forma de uma curva que relacione a incidência da taxa/abatimento com base na eficiência do veículo sob forma contínua ou discreta, de maneira semelhante ao estabelecimento de padrões contínuos ou por categorias. Um exemplo de *feebate* pode ser observado na Figura 150.

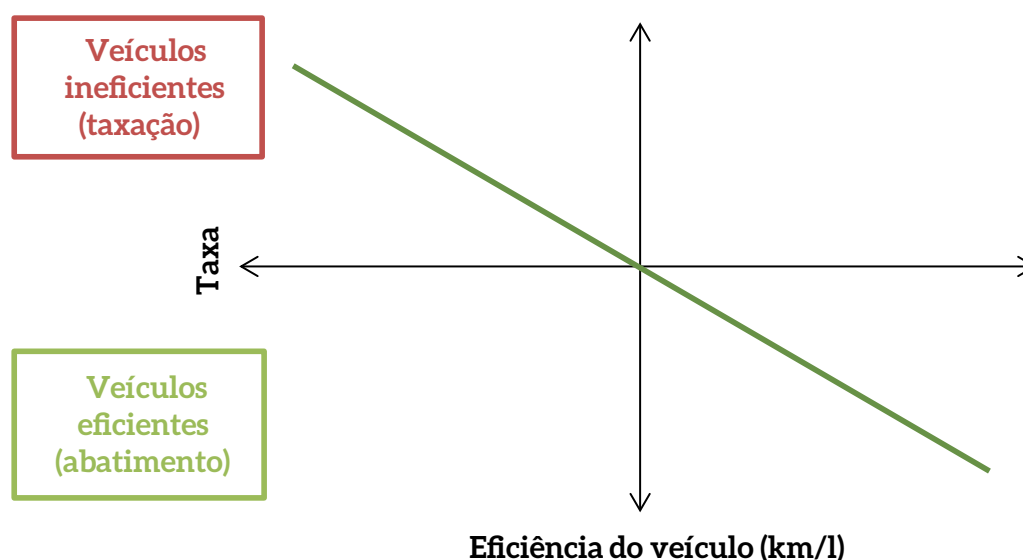


Figura 150 – Exemplo de um Sistema de *Feebate*

Fonte: Adaptado de ICCT, 2010

Duas variáveis são especialmente relevantes na definição de um *feebate* (ICCT, 2010):

- *Benchmark*:⁵¹ o ponto onde não há nenhuma taxa ou abatimento adicional. Idealmente, seu valor deve ser definido de forma que taxas e abatimentos do *feebate* se anulem, pois isso tende a tornar a manutenção do programa mais sustentável ao longo do tempo – isso pode exigir que o *benchmark* seja redefinido periodicamente (ICCT, 2010);
- Inclinação da reta: seu valor determina os custos e benefícios marginais do investimento em eficiência energética. A recomendação do ICCT (2010) é que a inclinação da reta seja contínua e não categorizada.

⁵⁰ *Feebate* é uma conjunção entre as palavras taxa (*fee*), referindo-se à taxa dos veículos ineficientes, e abatimento (*rebate*), referindo-se ao abatimento fiscal sobre veículos eficientes (GREENE, 2010b).

⁵¹ Também referido como *pivot point* (ICCT, 2010).

Cabe destacar que, caso taxações e abatimentos advindos do *feebate* se anulem, o programa deixa de ser uma taxa (ou subsídio) e torna-se uma transferência (ICCT, 2010). Outro ponto digno de nota é que, embora não seja necessário, um *feebate* pode comportar ajuste baseado em atributos do veículo (ICCT, 2010), de forma semelhante aos padrões de eficiência veicular.

Taxações sobre a venda do veículo afetam somente a escolha do consumidor no momento de aquisição e não tendem a afetar seu comportamento ao dirigir após a compra nem a intensidade com que se decide utilizar o automóvel (IEA, 2012c). Nesse sentido, a taxa sobre o combustível e o uso do veículo (sob a forma, por exemplo, de pedágios urbanos) tem o potencial de afetar ambos. As taxações sobre o combustível existem na maior parte dos países, porém, em geral, com fins arrecadatórios, e não de eficiência (RYAN; FERREIRA; COVERLY, 2009).

A seguir, serão descritas as experiências internacionais e nacional relativas à adoção de instrumentos de políticas públicas visando à efficientização veicular.

8.1.1.4 EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS

As experiências internacionais avaliadas neste trabalho são a norte-americana, a europeia e a japonesa. O critério de seleção de experiências relevantes foi qualitativo – as experiências europeia e japonesa podem ser consideradas um *benchmark* no que diz respeito à eficiência energética de veículos leves, e a experiência norte-americana representa um dos programas mais antigos ainda em atividade.

a) Estados Unidos

Em resposta ao aumento de preços de petróleo no início da década de 1970, o Corporate Average Fuel Economy (Cafe) – ou economia de combustível corporativa média, em tradução livre – foi aprovado pelo Congresso americano em 1975. A lei originalmente buscava dobrar a eficiência de veículos de passageiros, de 13,5 mpg (milhas por galão) para 27,5 mpg, dentro de dez anos, meta que de fato foi atingida em 1985. No mesmo período, a eficiência de caminhões leves aumentou de 11,6 mpg para 19,5 mpg (PEW, 2011). Adicionalmente, no ano de 1978, foi instituída a *gas guzzler tax*,⁵² taxa incidente sobre a venda de veículos de baixa eficiência (USA/EPA, 2012a).

Em meados da década de 1980, contudo, por meio do *lobby* das empresas Ford e General Motors, os padrões de eficiência foram reduzidos para 26 mpg em 1986 e houve poucas mudanças na política de eficiência veicular norte-americana por duas décadas (PEW, 2011). Somente no ano de 2007, o Congresso americano voltou a aumentar os requerimentos de eficiência do Cafe e, a partir de 2009, o governo passou a adotar padrões de eficiência progressivamente exigentes (PEW, 2011). Nesse meio tempo, a comunicação direta da eficiência do veículo via etiquetagem passou a ser utilizada nos Estados Unidos, conforme disposto na Figura 151.

52 Taxa de grande consumidor de gasolina, em tradução aproximada. *Guzzler* representa uma pessoa que bebe em excesso.



Figura 151 – Etiquetação de Veículos Leves nos Estados Unidos

Fonte: MAHLIA et al., 2011

Atualmente, as metas americanas são determinadas em termos de emissões de CO₂ por distância percorrida, e o objetivo proposto pelo programa é alcançar a emissão de 143 gramas de CO₂ equivalente por milha em 2025 para veículos de passageiros (USA/EPA, 2012b). Cabe destacar, porém, que a regulação americana engloba caminhões leves (USA/EPA, 2012b).

Os padrões de emissão dos EUA são determinados por curvas em função do tamanho do veículo, medido pela área projetada do veículo.^{53,54} Cada montadora tem uma meta específica, dependendo da média ponderada pelas vendas da área projetada de seus veículos (USA/NHTSA, 2011). Isto é, têm uma meta para a sua frota e nenhum veículo é obrigado a cumprir individualmente os padrões de eficiência. O objetivo dessa forma de regulação é distribuir o ônus da meta por todos os veículos e todas as montadoras, de forma a não incentivar a construção de veículos de um determinado tipo ou tamanho (USA/EPA, 2012b). As metas estadunidenses são progressivamente rigorosas até o ano de 2025, conforme indicam as curvas da Figura 152, em cuja abscissa está representada a área do veículo (em pés cúbicos – sf) e em cuja ordenada está sua eficiência (em milhas por galão – mpg).

53 Não se trata da área total projetada pelo veículo, e sim da área determinada pelas suas rodas (HICKS, 2010).

54 A área projetada do veículo também é referida como *footprint* (pegada, em inglês), conforme se pode observar na Figura 152.

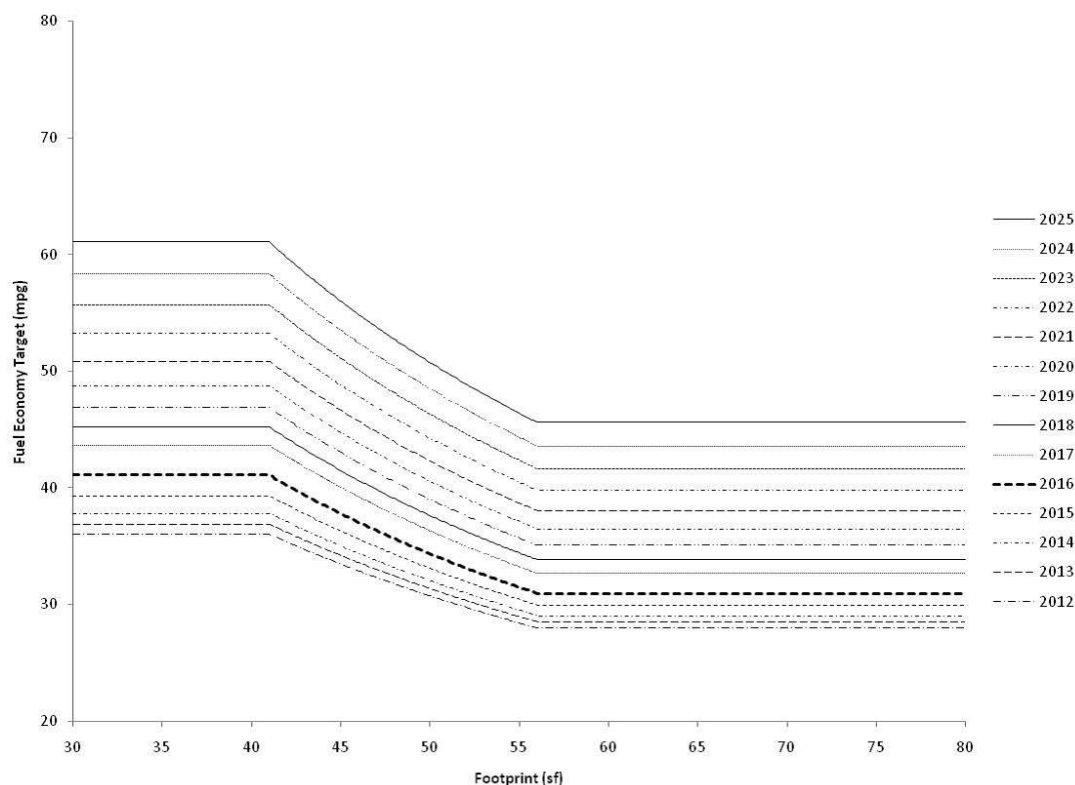


Figura 152 – Metas do CAFE até 2025

Fonte: USA/NHTSA, 2011

Como indicam as curvas, de modo geral, quanto maior o veículo, menor a sua meta. Contudo, a partir de aproximadamente 55 pés cúbicos, as metas são iguais, independentemente do tamanho do veículo (o mesmo pode ser dito de veículos de pequeno porte, os quais, caso menores que 40 pés cúbicos, têm a mesma meta).

Para que seja possível o atendimento às metas propostas, novas tecnologias deverão ser incorporadas aos veículos fabricados. Segundo projeções da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2012c), dentre as tecnologias que serão adotadas pelas montadoras, incluem-se melhorias em motores a gasolina e nos sistemas de transmissão, redução de peso veicular, pneus com menor resistência ao rolamento, melhor aerodinâmica dos veículos, melhorias em motores a diesel e acessórios mais eficientes. A expectativa da EPA é de que a maior parte dos avanços de eficiência ocorram nos motores de combustão interna, sejam eles movidos a gasolina ou a diesel. Como a regulação dos Estados Unidos é definida em termos de emissão de CO_2 equivalente por distância percorrida (apesar de as multas serem definidas em termos de milhas por galão), nem todas as tecnologias estão voltadas necessariamente a um melhor aproveitamento do combustível: esperam-se também aperfeiçoamentos nos sistemas de ar-condicionado, cujos gases refrigerantes são, em geral, hidrofluorcarbonos (HFC) de alto potencial de aquecimento global (USA/EPA, 2012c). O Quadro 19 apresenta um resumo da política de eficiência veicular norte-americana.

Quadro 19 – Resumo da Política de Eficiência Veicular dos EUA

Tipo de política de eficiência veicular	Pergunta	Resposta (Estados Unidos)
Medidas informacionais	Tem programa de etiquetagem veicular?	Sim. Figura 151.
Padrões de eficiência veicular	Tem padrão de eficiência veicular?	Sim.
	Como são definidas as metas?	Em gramas de CO ₂ equivalente emitidas por milha, com base em uma curva contínua em seu centro e plana nas extremidades. Figura 152.
	É utilizado um atributo para ponderação?	Sim, a área do veículo.
	Como são definidas as metas?	Com base na média ponderada da área dos veículos vendidos nos EUA pela montadora. Uma vez calculada a área média, é possível saber a meta da empresa com base na curva disposta na Figura 152.
	Como é avaliado seu cumprimento?	Calcula-se a eficiência média da montadora com base na média harmônica ponderada pelas suas vendas nos EUA. A eficiência média da montadora deve então situar-se abaixo da curva disposta na Figura 152.
	Há multas pelo não atendimento das metas?	Sim, no valor de US\$ 5,50 por 0,1 mpg distante da meta, por veículo.
Medidas fiscais	Taxação sobre combustível?	Não com fins declarados de eficiência veicular.
	Taxação sobre a aquisição do veículo?	Sim, por meio da <i>gas guzzler tax</i> .

Fonte: Elaboração própria

b) Europa

Inicialmente, a União Europeia buscou incentivar a eficiência da indústria automotiva por meio de acordos voluntários com as montadoras e o objetivo era atingir uma eficiência média para a indústria de 140 gramas de CO₂ por quilômetro até o ano de 2008 (UNEP, 2011). Contudo, a meta não foi atingida e, em abril de 2009, a Comissão Europeia estabeleceu regulações mandatórias com o objetivo de atingir a emissão média de 130 g CO₂/km para a frota no ano de 2015 (UNEP, 2011).

A regulação europeia é baseada em uma curva contínua dada em função do peso (massa) do veículo. O valor máximo médio permitido de emissões para cada montadora, para o ano de 2015, é dado pela *limit value curve*,⁵⁵ conforme a Figura 153.

55 Curva de valores-limite, em tradução livre.

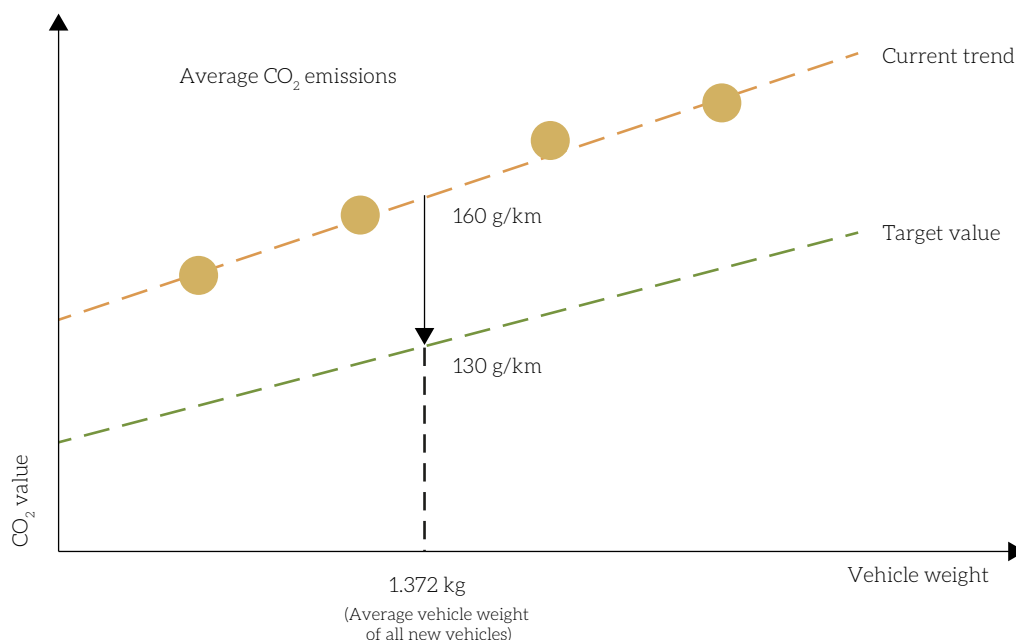


Figura 153 – Metas do União Europeia para 2015

Fonte: IEA, 2012c

As metas da União Europeia foram definidas tendo em conta uma massa média dos veículos igual a 1.372 kg. Caso essa média mantenha-se até 2015 e todos os fabricantes cumpram exatamente a meta, a média do desempenho dos veículos europeus será igual a 130 g de CO₂ por quilômetro. Independentemente do peso médio dos veículos vendidos, todo fabricante deve situar-se abaixo da curva, ou seja, a emissão média por quilômetro de seus veículos deve ser inferior à ditada pela regulação. Dessa forma, fabricantes de veículos mais pesados que a média podem ter emissões acima de 130 g/km e fabricantes de veículos mais leves devem ter emissões mais baixas. Assim, como a *limit value curve* europeia é definida somente para o ano de 2015, há uma fase de *phasing-in*⁵⁶ em que uma parcela cada vez maior da frota deve atender às metas para o ano de 2015. Em 2012, 65% dos veículos devem atender aos valores da curva-limite. Esse percentual aumentou para 75% em 2013 e para 80% em 2014. Logicamente, em 2015, 100% da frota devem atender à curva (EUROPEAN COMMISSION, 2014).

As multas referentes ao não atendimento das metas são de € 5 para o primeiro g/km acima do valor estipulado, € 15 para o segundo g/km, € 25 para o terceiro e € 95 para cada g/km adicional (EUROPEAN COMMISSION, 2014). O valor da multa em função das emissões e da eficiência de um veículo a gasolina⁵⁷ pode ser observado na Figura 154.

⁵⁶ Entrando gradualmente, em tradução livre.

⁵⁷ Vale ressaltar que veículos a diesel são parte significativa da frota europeia.

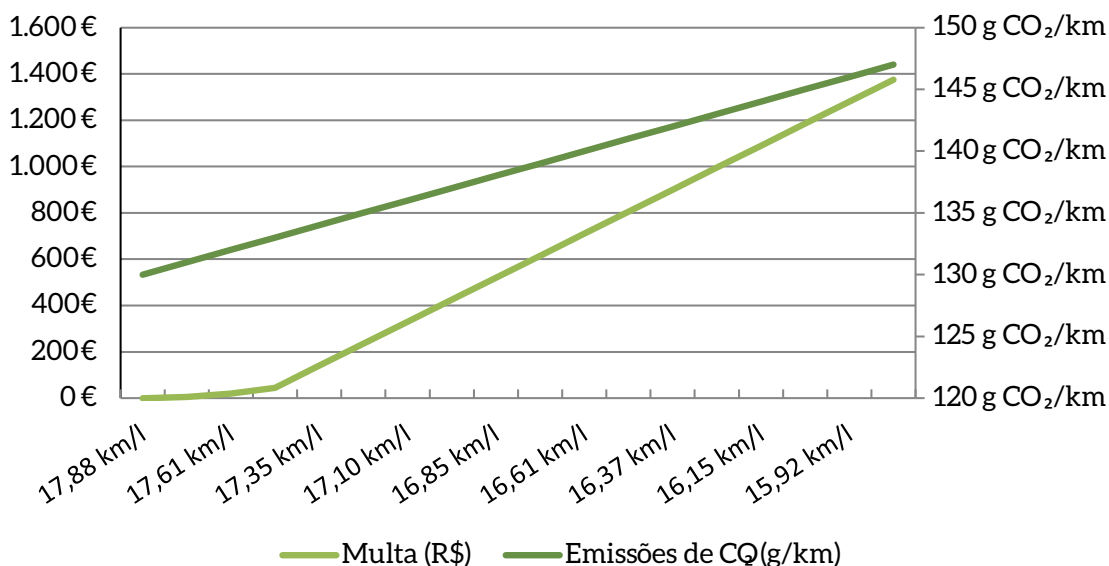


Figura 154 – Valor da Multa da Regulação Europeia de 2015

Fonte: Elaboração própria a partir de EUROPEAN COMMISSION, 2014

Novas metas foram posteriormente definidas pela União Europeia para o ano de 2021 (EUROPEAN COMMISSION, 2014). Seu objetivo é alcançar uma emissão média de 95 gramas de CO₂ por quilômetro. A inclinação da *limit value curve* foi mantida na regulação de 2021, tendo sido alteradas somente a massa média e a emissão média pretendida, para 95 g CO₂/km (EUROPEAN COMMISSION, 2012). O *phasing in* foi tornado pontual e aplica-se somente ao ano de 2020, no qual 95% da frota devem atender à curva, e a multa tornou-se constante e igual a € 95 para cada g/km adicional (EUROPEAN COMMISSION, 2014).

Dada a natureza internacional da União Europeia, cada país segue políticas energéticas complementares. Alguns países, como a França, optaram por implementar um programa de *feebate*, e a Noruega definiu uma forte taxação sobre o combustível, representando aproximadamente 63% de seu preço final em 2007 (UNEP, 2011). O Reino Unido, por exemplo, adota uma medida informacional dada pelo sistema gráfico de comparação, cuja etiqueta está representada na Figura 155.

Fuel Economy		VED band and CO ₂																											
CO₂ emission figure (g/km) <table border="1"> <thead> <tr> <th>Band</th> <th>CO₂ Emission Range (g/km)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>A</td><td>0-100</td></tr> <tr><td>B</td><td>101-110</td></tr> <tr><td>C</td><td>111-120</td></tr> <tr><td>D</td><td>121-130</td></tr> <tr><td>E</td><td>131-140</td></tr> <tr><td>F</td><td>141-150</td></tr> <tr><td>G</td><td>151-160</td></tr> <tr><td>H</td><td>161-170</td></tr> <tr><td>I</td><td>171-180</td></tr> <tr><td>J</td><td>181-190</td></tr> <tr><td>K</td><td>191-200</td></tr> <tr><td>L</td><td>201-210</td></tr> </tbody> </table>		Band	CO ₂ Emission Range (g/km)	A	0-100	B	101-110	C	111-120	D	121-130	E	131-140	F	141-150	G	151-160	H	161-170	I	171-180	J	181-190	K	191-200	L	201-210		
Band	CO ₂ Emission Range (g/km)																												
A	0-100																												
B	101-110																												
C	111-120																												
D	121-130																												
E	131-140																												
F	141-150																												
G	151-160																												
H	161-170																												
I	171-180																												
J	181-190																												
K	191-200																												
L	201-210																												
Fuel cost (estimated) for 12,000 miles A fuel cost figure indicates to the consumer a guide price for comparison purposes. This figure is calculated by using the combined drive cycle (town, extra-urban and motorway) and average fuel price. Re-calculated annually, the cost per litre as at Mar 2012 is as follows: - petrol 130p, diesel 147p, LPG 74p. VED for 12 months Vehicle excise duty (VED) or road tax varies according to the CO₂ emissions and fuel type of the vehicle.																													
		1 st Year rate*	Standard rate*																										
Environmental Information A guide on fuel economy and CO₂ emissions which contains data for all new passenger car models is available at any point of sale free of charge. In addition to the fuel efficiency of a car, driving behaviour as well as other non-technical factors play a role in determining a car's fuel consumption and CO₂ emissions. CO₂ is the main greenhouse gas responsible for global warming.																													
Make/Model:		Engine Capacity (cc):																											
Fuel Type:		Transmission:																											
Fuel Consumption: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Drive cycle</th> <th>Litres/100km</th> <th>Mpg</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Urban</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Extra-urban</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Combined</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>				Drive cycle	Litres/100km	Mpg	Urban			Extra-urban			Combined																
Drive cycle	Litres/100km	Mpg																											
Urban																													
Extra-urban																													
Combined																													
Carbon dioxide emissions (g/km): Important note: Some specifications of this make/model may have lower CO₂ emissions than this. Check with your dealer.																													
 To compare fuel costs and CO₂ emissions of new cars, visit http://carfueldata.direct.gov.uk/ 																													

Figura 155 – Etiqueta de Veículos Leves no Reino Unido

Fonte: IEA, 2012c

O Quadro 20 apresenta um resumo da política de eficiência veicular europeia.

Quadro 20 – Resumo da Política de Eficiência Veicular Europeia

Tipo de política de eficiência veicular	Pergunta	Resposta (União Europeia)
Medidas informacionais	Tem programa de etiquetagem veicular?	Sim. Figura 155.
Padrões de eficiência veicular	Tem padrão de eficiência veicular?	Sim.
	Como são definidas as metas?	Em gramas de CO ₂ equivalente emitidas por quilômetro, com base em uma curva contínua. Figura 153.
	É utilizado um atributo para ponderação?	Sim, o peso (massa) do veículo.
	Como são definidas as metas?	Com base na média ponderada do peso dos veículos vendidos pela montadora. Uma vez calculado o peso médio, é possível saber a meta da empresa com base na curva disposta na Figura 153.
	Como é avaliado seu cumprimento?	Calcula-se a eficiência média da montadora com base na média ponderada pelas suas vendas. A eficiência média da montadora deve então situar-se abaixo da curva disposta na Figura 153.
	Há multas pelo não atendimento das metas?	Sim, Figura 154.
Medidas fiscais	Taxação sobre combustível?	Sim, a depender do país em questão.
	Taxação sobre a aquisição do veículo?	Sim, a depender do país em questão.

Fonte: Elaboração própria

c) Japão

Com o objetivo de encorajar a conservação de energia em atividades industriais, transportes e edifícios, a lei japonesa de uso racional de energia foi criada em 1976, pouco depois do aumento de preços ocorrido em 1973. Maior atenção foi dada a essa lei após mais um aumento dramático de preços no ano de 1979, e a lei passou a incluir a eficiência energética de veículos já com o estabelecimento de padrões (IGUCHI, 2008).

Durante as décadas de 1980 e 1990, a preocupação ambiental no Japão cada vez mais uniu-se às preocupações de conservação de energia, impulsionados pela criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, em 1992. Em 1993, foram estabelecidas novas metas para veículos a gasolina, as quais deveriam ser cumpridas até o ano de 2000. No ano seguinte, após a adoção do Protocolo de Quioto, em 1998, a lei de uso racional de energia foi amplamente revisada e dentre as revisões mais notáveis está a introdução da abordagem *top runner* (IGUCHI, 2008).

Segundo Kimura (2010), o escopo do programa *top runner* é baseado em três critérios: i) produtos que envolvam produção doméstica significativa; ii) produtos que consumam uma quantidade substancial de energia na fase de uso; e iii) produtos com potencial considerável de melhoria em sua eficiência energética. Inicialmente, o programa englobava nove produtos, entre os quais incluíam-se equipamentos de ar-condicionado, lâmpadas fluorescentes, televisões, computadores, geladeiras e veículos de passageiros e de carga. Esse escopo é revisado periodicamente e foi expandido para 21 produtos em 2009 (KIMURA, 2010). As principais características da abordagem *top runner* podem ser resumidas nos seguintes pontos (KIMURA, 2010):

- O *top runner* (que representa o equipamento mais eficiente) torna-se o padrão, eventualmente acrescido de melhorias que consideram o potencial tecnológico. Esse padrão deve ser atingido por todas as empresas após um dado período de tempo;
- Padrões diferenciados são estabelecidos com base em diferentes parâmetros;
- O cumprimento dos padrões é avaliado em cada empresa com base em uma média ponderada.

Como o estabelecimento dos padrões é baseado no equipamento mais eficiente disponível à época da definição do padrão, a abordagem é essencialmente baseada em dados de mercado, o que torna factível o alcance dos níveis desejados de eficiência energética (KIMURA, 2010). Contudo, a abordagem *top runner* considera também a penetração de novas tecnologias no mercado que possam tornar os equipamentos ainda mais eficientes no futuro. Dessa forma, os padrões são frequentemente definidos em níveis de eficiência acima do atual *top runner* (KIMURA, 2010).

Em se tratando de veículos leves, atualmente, um fator adicional é levado em conta: a penetração de veículos híbridos, cuja eficiência tem se mostrado superior à dos demais veículos (KAJIWARA, 2012). De forma a contemplar essa particularidade, as metas japonesas para 2020 consideram uma determinada penetração de veículos híbridos, bem como aumentos de eficiência para veículos híbridos e veículos tradicionais (KAJIWARA, 2012). A Figura 156 ilustra esse processo.

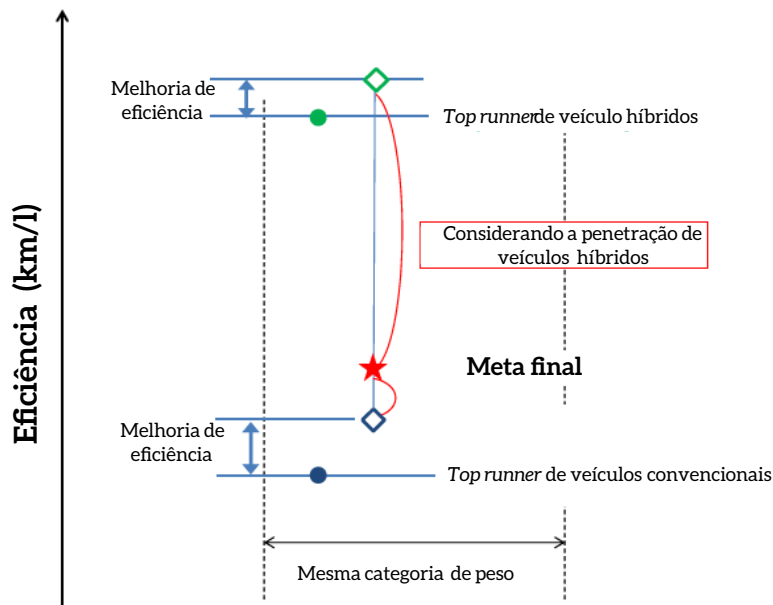


Figura 156 – Processo de Definição de Metas da Política Japonesa para 2020

Fonte: Traduzido de KAJIWARA, 2012

Outro importante aspecto da abordagem *top runner* é que os padrões são diferenciados com base em diversos parâmetros. No caso de veículos, o parâmetro utilizado é o peso dos veículos e, em algumas situações, o parâmetro é discretizado em categorias e não é avaliado de forma contínua (KIMURA, 2010).

Nas metas definidas para o ano de 2020, apesar de haver uma discretização das metas de acordo com categorias, as montadoras não serão obrigadas a cumprir as metas individualmente em cada categoria (como ocorria anteriormente), contanto que, quando calculada a média harmônica da montadora ponderada pelas vendas de veículos, ela esteja acima do padrão definido (DAISHO et al., 2011). Antes de 2020, a média harmônica era aplicada em cada categoria, e a montadora deveria cumpri-las individualmente (DAISHO et al., 2011).

As metas japonesas para os anos de 2010, 2015 e 2020 podem ser observadas na Figura 157. Espera-se que, com essas metas, a eficiência média da frota japonesa de veículos vendidos alcance 16,8 km/l em 2015 e 20,3 km/l em 2020 (IEA, 2012c).

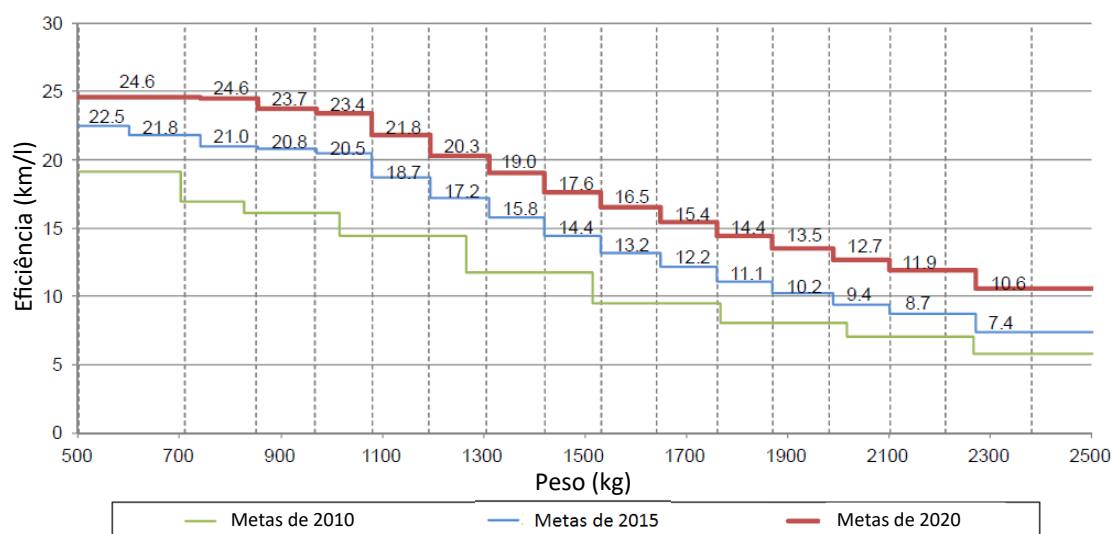


Figura 157 – Metas Japonesas para os Anos de 2010, 2015 e 2020

Fonte: Traduzido e adaptado de KAJIWARA, 2012

Apesar de existirem multas no caso do não cumprimento de metas por parte das montadoras japonesas, elas têm pouca importância (FEDERAL CHAMBER OF AUTOMOTIVE INDUSTRIES, 2011), uma vez que a multa é limitada ao valor de ¥ 1 milhão (equivalente a pouco menos de US\$ 10 mil) e é apenas aplicada como último recurso (DAISHO et al., 2011). A primeira penalidade enfrentada pela montadora é uma advertência, seguida por uma declaração pública (caso após dado tempo ainda não tenha sido cumprida a meta), seguida por uma ordem direta (caso ainda não tenha sido cumprida) e, por fim, quando esgotados todos esses mecanismos, a multa de ¥ 1 milhão é aplicada (DAISHO et al., 2011).

Além do padrão de eficiência veicular, outros aspectos notáveis da política japonesa envolvem medidas fiscais, como taxações na aquisição do veículo, com base em sua categoria, e taxas anuais baseadas no peso e na potência do veículo (ICCT, 2011a). No Japão, apenas os veículos com performance acima da média para sua classe de veículo recebem uma etiqueta, a qual informa o percentual em que o automóvel supera a média, conforme pode ser visualizado na Figura 158.



Figura 158 – Etiquetação de Veículos Leves no Japão

Fonte: IEA, 2012c

A política japonesa tem obtido bons resultados, uma vez que seus objetivos têm sido cumpridos com certa antecedência em relação à data-limite. Os padrões de 2010 para veículos leves a gasolina foram atingidos (com base na média da frota) em 2005 e, no ano de 2008, mais de 90% da frota já haviam alcançado o padrão definido (KIMURA, 2010). O Quadro 21 resume os principais aspectos da política de eficiência veicular japonesa.

Quadro 21 – Resumo da Política de Eficiência Veicular Japonesa

Tipo de política de eficiência veicular	Pergunta	Resposta (Japão)
Medidas informacionais	Tem programa de etiquetagem veicular?	Sim, Figura 158.
Padrões de eficiência veicular	Tem padrão de eficiência veicular?	Sim.
	Como são definidas as metas?	Em km/l, com base em uma curva discreta. Figura 157.
	É utilizado um atributo para ponderação?	Sim, o peso (massa) do veículo.
	Como são definidas as metas?	Até 2015, a meta era definida por categorias. A partir de 2020, é definida com base na média ponderada do peso dos veículos vendidos pela montadora, que é confrontada com a Figura 157.
	Como é avaliado seu cumprimento?	Calcula-se a eficiência média da montadora com base na sua média harmônica ponderada pelas vendas. A eficiência média da montadora deve então situar-se acima da curva disposta na Figura 157.
Medidas fiscais	Há multas pelo não atendimento das metas?	Há, porém são pouco relevantes. As maiores penalidades não são financeiras, como advertências e divulgação pública do não cumprimento de metas.
	Taxação sobre combustível?	Não com fins explícitos de eficiência veicular.
	Taxação sobre a aquisição do veículo?	Sim, com base em sua categoria (há também taxas anuais com base em potência e peso).

Fonte: Elaboração própria

8.1.1.5 EXPERIÊNCIA NACIONAL

No histórico brasileiro de regulação da eficiência energética, três programas se destacam: o Programa de Economia de Combustíveis (Peco), o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular e o Inovar-Auto. É importante mencionar também o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve), apesar de não se tratar de um programa voltado para a eficiência energética veicular.

a) Programa de Economia de Combustíveis (Peco)

Pode-se dizer que a primeira ação no que poderia ser classificado como uma política brasileira de eficiência energética veicular foi o Programa de Economia de Combustíveis, formalizado em 1979 entre o governo e as montadoras (representadas pela Anfavea) e implementado no período de 1983 a 1986 (NOGUEIRA; BRANCO, 2005). As duas principais ações do programa foram a publicação de guias com as informações de eficiência (em km/l) dos modelos de automóveis disponíveis no mercado nacional e o estabelecimento de metas de consumo a serem progressivamente atingidas pelos fabricantes nacionais (metas que teriam sido atingidas durante a vigência do programa) (NOGUEIRA; BRANCO, 2005). Segundo Nogueira e Branco (2005), a partir de 1985, com a queda nos preços do petróleo, o programa perdeu prioridade e foi suspenso em 1987.

b) Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve)

O Proconve foi instituído em 1986, por meio da resolução Conama nº 18/1986. Fruto de uma preocupação com a qualidade do ar na região metropolitana de São Paulo, o objetivo do programa era reduzir a poluição local e regional causada por novos veículos leves e pesados (MENDES, 2004). Inicialmente, para veículos leves do ciclo Otto, os poluentes regulados foram monóxido de carbono, hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio (BRASIL/CONAMA, 1986). Contudo, embora um veículo mais eficiente, tudo o mais constante, tenha menor emissão específica (e.g. medida em gramas de poluente por quilômetro), há tecnologias que tratam exclusivamente da emissão de poluentes locais como os regulamentados pelo Proconve, sem influenciar a eficiência energética do veículo como um todo.⁵⁸ Alguns exemplos de tecnologias são o uso de conversores catalíticos e filtros para partículas (MENDES, 2004).

c) Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV)

No que tange à eficiência de veículos automotores, a política posterior ao Peco foi o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV), inserido no âmbito do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). Surgido também na década de 1980, o PBE tem o objetivo de racionalizar o consumo energético dos equipamentos mais utilizados no país, além de orientar consumidores sobre a eficiência dos produtos comercializados. Os produtos que participam do programa são avaliados em testes de conformidade – cabe destacar que o programa é coordenado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro).

58 O mesmo não pode ser dito das emissões de CO₂, que apresentam alta correlação com o consumo de combustível dos veículos. Considere-se, por exemplo, a política de eficiência energética veicular europeia, que estabelece suas metas para automóveis novos com base nas emissões de CO₂ por quilômetro rodado.

Em maio de 2005, foi constituído o Comitê Técnico de Eficiência Veicular, presidido pelo Programa Nacional de Racionalização do Uso de Derivados de Petróleo de Gás Natural (Conpet)⁵⁹ e sob a orientação da Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético do Ministério de Minas e Energia, e foram iniciados estudos para a concepção de um programa de etiquetagem na frota de novos veículos leves. Entre os anos de 2005 e 2008, foram realizadas diversas reuniões entre membros do Poder Executivo, Conpet e Anfavea com o fim de buscar um acordo com a indústria automobilística sobre um programa de etiquetagem (BASTIN, 2010). Nesse período, segundo Bastin (2010), a Anfavea colocou alguns obstáculos⁶⁰ à instituição de um programa de etiquetagem com caráter obrigatório, o que levou os representantes do Inmetro a estabelecerem-no inicialmente como voluntário.

No final do ano de 2008, por meio da Portaria Inmetro nº 391, o Regulamento de Avaliação da Conformidade para Etiquetagem de Veículos Leves de Passageiros e Comerciais Leves com Motores do Ciclo Otto foi aprovado, estabelecendo o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (BASTIN, 2010).

Da mesma forma que o restante do Programa Brasileiro de Etiquetagem, o PBEV é uma medida informacional, com o objetivo de “auxiliar os consumidores na decisão de compra” e “estimular a fabricação e importação de veículos mais eficientes” (BRASIL/INMETRO, 2014b). Sua principal ferramenta é a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (Ence), a qual classifica os veículos em cinco categorias, de A (mais eficiente) a E. O modelo de Ence para veículos leves, além de breves explicações a respeito dos pontos abordados por ela, está disposto na Figura 159 (BRASIL/INMETRO, 2014b).

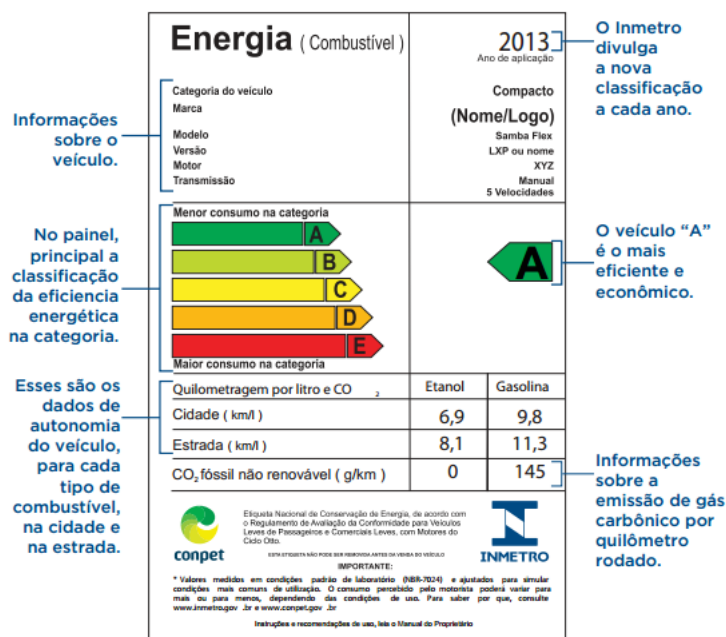


Figura 159 – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia para Veículos Leves

Fonte: BRASIL/INMETRO, 2014b

59 O Conpet é um programa federal criado em 1991 para promover a racionalização no uso dos recursos naturais não renováveis no Brasil. É vinculado ao Ministério de Minas e Energia e executado com apoio técnico e administrativo da Petrobras (BRASIL/INMETRO, 2014b).

60 Os empecilhos citados por Bastin (2010) são a diferença entre a medição de eficiência representada na etiqueta e a eficiência em condições reais e o fato de a lei de eficiência energética (Lei nº 10.295, de outubro de 2001) não usar a palavra “veículo”, mas máquinas e aparelhos consumidores de energia.

Além da classificação na categoria, as principais informações fornecidas pela Ence são a eficiência do veículo (em km/l e em g CO₂/km) a etanol e a gasolina, na estrada e na cidade. Outras informações de destaque, que podem ser vistas no *site* do programa⁶¹ são a emissão de poluentes locais (em gramas de poluente por quilômetro) e o consumo energético (em megajoules por quilômetro) – o qual serve de base à classificação nas faixas de consumo.

A adesão ao PBEV é facultada a fabricantes e importadores de automóveis e deve ser renovada a cada ano. Para tal, o fornecedor deve informar os valores de consumo energético de no mínimo 50% de todos os seus modelos de automóveis novos previstos para comercialização no período (BRASIL/INMETRO, 2014b). Esse é um ponto crítico do programa, pois as montadoras podem optar por informar a eficiência de seus modelos mais econômicos e ocultar as informações de consumo de seus modelos menos eficientes (BASTIN, 2010).

Para que seja apurada a eficiência dos veículos, os procedimentos padronizados para os ensaios do PBEV são realizados de acordo com a norma ABNT NBR 7024: Medição do Consumo de Combustível de Veículos Rodoviários Automotores Leves, por meio de ciclos de condução que simulam o uso dos veículos em trânsito urbano e de estrada (BASTIN, 2010).

Dentro do PBEV, os veículos são agrupados em oito categorias, das quais quatro se baseiam no uso do veículo: esportivo, fora de estrada, comercial leve e veículo de carga derivado de veículo de passageiro; e as outras quatro são classificadas conforme o tamanho da área projetada do veículo no solo (em m²): subcompacto, compacto, médio e grande (BASTIN, 2010).

De acordo com Bastin (2010), a divisão dos veículos em categorias é própria dos programas comparativos relativos de etiquetagem, que geralmente apresentam um parâmetro de comparação para toda a frota (como peso, capacidade volumétrica do motor, tamanho, potência, volume interno e outros). No PBEV, o parâmetro baseado no tamanho foi escolhido para classificar as categorias de veículos mais leves do mercado (subcompacto, compacto, médio e grande), enquanto os mais pesados são comparados de forma independente nas categorias carga derivado de veículo de passageiro, comercial leve e fora de estrada, além de esportivo (BASTIN, 2010).

Dessa forma, os segmentos de mercado de picapes compactas, SUV, fora de estrada, picapes grandes e carros esportivos são excluídos da classificação por tamanho e frequentemente são utilizados no Brasil como carros de passeio (BASTIN, 2010). Na opinião de Bastin (2010), esse tipo de divisão dos veículos diminui a capacidade do consumidor de identificar que os modelos de uma categoria superior de tamanho e peso são geralmente menos eficientes que os modelos de uma categoria inferior.

Outro ponto negativo destacado pela autora é que há uma margem de tolerância ($\pm 0,10$ m²) na classificação de tamanho, a qual permite que a montadora escolha a categoria mais conveniente para enquadrar determinados modelos de veículo,⁶² podendo obter, assim, melhor classificação em uma classe superior de tamanho (BASTIN, 2010).

61 Disponível em: <<http://pbeveicular.petrobras.com.br/TabelaConsumo.aspx>>. Acesso em: 18 nov. 2014.

62 Segundo Bastin (2010), no ano de 2009, os veículos Gol (Volkswagen) e Linea (Fiat) tiveram a oportunidade de apresentar uma classificação melhor em uma classe superior de tamanho, devido à margem de tolerância.

d) Programa Inovar-Auto

O Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores (Inovar-Auto), também chamado de Novo Regime Automotivo, foi criado pela Lei nº 12.715, de 2012, e regulamentado pelo Decreto nº 7.819/2012.⁶³ Consiste em um incentivo tributário associado ao investimento, à agregação de valor, ao emprego, à inovação, à segurança veicular e à eficiência energética dos veículos (BRASIL/ABDI, 2013a).

Há dois principais benefícios tributários previstos pelo regime: crédito presumido de 30 pontos percentuais de Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) para as empresas habilitadas ao regime (a partir da data de habilitação) e, a partir de 2017, abatimento de um ou dois pontos percentuais de IPI, dependendo do consumo energético dos veículos fabricados pela empresa (BRASIL/MDIC, 2012). O crédito presumido do IPI é um ressarcimento das contribuições para o PIS/Pasep e Cofins incidentes sobre aquisições no mercado interno de produtos utilizados no processo produtivo, aplicável a empresas produtoras e exportadoras de mercadorias nacionais (BRASIL/RECEITA FEDERAL, 2014). Logo, trata-se de um benefício aplicável somente a empresas exportadoras.

Quanto aos 30 pontos percentuais de crédito presumido, é interessante notar que, apesar de a adesão ao Inovar-Auto ser facultativa, a criação do programa se deu pouco depois de um aumento de justamente 30% no IPI de automóveis, permitindo a compensação desse aumento (BRASIL/MDIC, 2012b). Portanto, apesar da adesão facultativa, há um forte incentivo econômico. Quanto ao abatimento adicional de IPI, ele está condicionado ao cumprimento de metas de eficiência energética.

Nas palavras da ABDI (2013b), “o principal compromisso do programa é o alcance de níveis mínimos de eficiência energética de todos os veículos comercializados no país.” A temática da eficiência energética é um dos cinco principais objetivos do Inovar-Auto, conforme listados a seguir (BRASIL/ABDI, 2013a):

- Fortalecer a cadeia de fornecimento automotivo;
- Assegurar investimento em pesquisa, desenvolvimento e inovação;
- Aumentar volume de gastos em engenharia e tecnologia industrial básica (TIB);
- Aumentar segurança dos veículos produzidos e comercializados no país;
- Aumentar eficiência energética dos veículos.

No âmbito do objetivo de aumentar a eficiência energética dos veículos, cinco medidas específicas são previstas (BRASIL/ABDI, 2013a):⁶⁴

- 1) Elaborar legislação de metas compulsórias a serem cumpridas por veículos pesados e leves comercializados no Brasil a partir de 2017;**

63 Houve ainda algumas modificações determinadas pelo Decreto nº 8.015/13.

64 Essa numeração não é utilizada pela ABDI (BRASIL/ABDI, 2013a), mas foi aqui empregada para que seja possível referenciar mais facilmente as medidas previstas.

- 2) Estabelecer metas de eficiência energética a serem cumpridas por automóveis e comerciais leves;⁶⁵
- 3) Definir limite mínimo de eficiência energética e tecnologia embarcada como critério nas licitações governamentais para aquisição de veículos pelo governo federal;
- 4) Definir limites mínimos de investimentos em P&D e engenharia, tecnologia industrial básica (TIB) e capacitação de fornecedores para as montadoras instaladas no país;
- 5) Ajustar o texto da Portaria Inmetro 544/2012, que trata dos requisitos de desempenho para pneus quanto aos parâmetros de resistência ao rolamento, aderência ao molhado e nível de ruído.

Cabe destacar que há apenas duas condições gerais à habilitação ao Inovar-Auto, descritas no art. 4º do Decreto nº 7.819 de 2012 (BRASIL, 2012):

- i) A regularidade da empresa solicitante em relação aos tributos federais;
- ii) O compromisso da empresa solicitante de atingir níveis mínimos de eficiência energética em relação aos produtos comercializados no país, nos termos do item 2 do Anexo II do mesmo decreto.

O responsável pela criação de metas compulsórias, a partir de 2017, a serem cumpridas por veículos pesados comercializados no Brasil é o Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC) e o prazo para sua conclusão é outubro de 2014. De acordo com informações da Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (BRASIL/ABDI, 2013a), encontra-se em curso uma avaliação comparativa de políticas públicas de outros países sobre eficiência energética de veículos pesados. Presume-se que o conhecimento gerado na formatação e na implementação dessas políticas poderia ser útil ao contexto nacional, sobretudo quanto aos arranjos institucionais e motivações socioeconômicas e ambientais (BRASIL/ABDI, 2013b). O relatório mais recente da ABDI (2014), de novembro de 2014, afirma que foi identificada uma necessidade de aprofundar a avaliação e que esta ainda encontra-se em curso.

No caso dos veículos leves,⁶⁶ as metas de eficiência energética foram discriminadas de acordo com o incentivo tributário correspondente (BRASIL, 2012):

- Meta mínima para habilitação ao Inovar-Auto;
- Meta para redução de alíquota de um ponto percentual no IPI;
- Meta para redução de alíquota de dois pontos percentuais no IPI.

As empresas deverão comprometer-se a cumprir, até o dia 1º outubro de 2017, as exigências de consumo energético máximo, em MJ/km, calculadas em função da massa dos veículos comercializados, ponderadas pelas vendas ocorridas nos últimos 12 meses. Trata-se de uma forma de regulação baseada em atributo (especificamente, a massa em ordem de marcha) com uma curva contínua de metas. A Figura 160 apresenta as metas de habilitação e abatimento de 1% e 2% no IPI em função da eficiência (em km/l) do veículo a gasolina e sua massa em ordem de marcha.

⁶⁵ Apesar de aparentemente haver uma sobreposição entre as medidas 1 e 2, já que a primeira menciona veículos leves e a segunda "automóveis e comerciais leves", será considerado, conforme implícito em (BRASIL/ABDI, 2013a), que a medida 1 diz respeito apenas a veículos pesados.

⁶⁶ Veículos leves, conforme o Decreto nº 7.819 de 2012, consistem em veículos equipados com motor a gasolina ou a etanol ou com motor que utilize alternativa ou simultaneamente gasolina e etanol (motorização *flex*) e os veículos híbridos e elétricos desde que se enquadrem em códigos específicos da Tabela de Incidência do Imposto sobre Produtos Industrializados (BRASIL, 2012). Em se tratando de motores de combustão interna, portanto, aplicam-se a veículos do ciclo Otto.

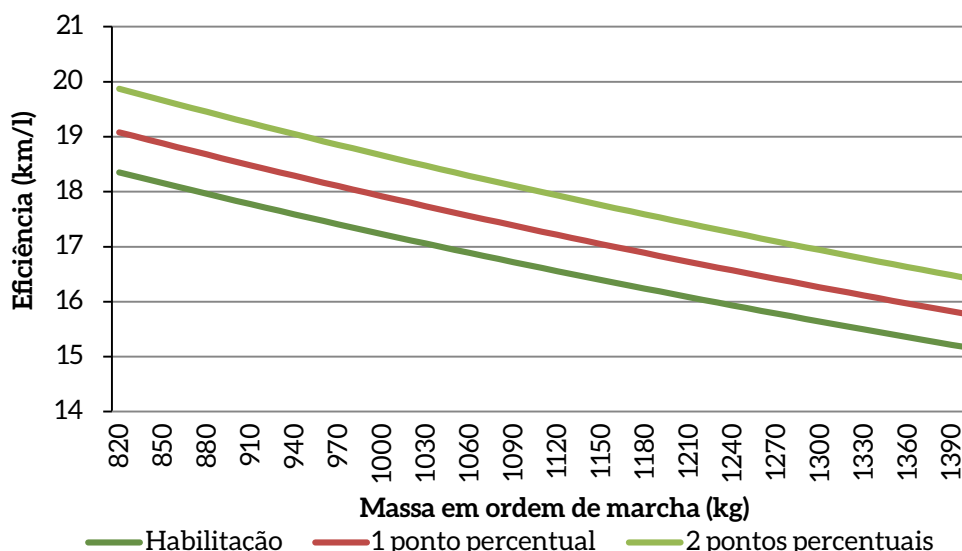


Figura 160 – Metas de Eficiência do Inovar-Auto de Acordo com o Peso do Veículo a Gasolina

Fonte: Elaboração própria com base em informações de BRASIL, 2012

Segundo a ABDI (2013b), a meta-alvo de 17,26 km/l para gasolina C ou 11,96 km/l para etanol hidratado, que segundo os valores adotados na referência seria equivalente à meta para redução de dois pontos percentuais no IPI, corresponde à meta europeia de 2015 (130 g de CO₂/km). Esse dado não é corroborado se utilizada a metodologia de conversão de g CO₂/km para km/l fornecida por ICCT (2014a) – 130 g CO₂/km seria equivalente a 18,5 km/l. Ressalva-se também que a meta europeia era obrigatória, enquanto a do Inovar-Auto de 17,26 km/l (para obtenção de dois pontos percentuais de abatimento no IPI) é facultativa.

Com as alterações dispostas pelo Decreto nº 8.015 de 2013, foram criadas sanções ao não atendimento das metas do programa. As multas previstas no caso da meta de eficiência energética (expressa em MJ/km) são de (BRASIL, 2013):

- i) R\$ 50,00 (cinquenta reais) para até o primeiro centésimo, inclusive, maior que o consumo energético correspondente à meta estabelecida para a empresa habilitada;
- ii) R\$ 90,00 (noventa reais) a partir do primeiro centésimo, exclusive, até o segundo centésimo, inclusive, maior que a meta;
- iii) R\$ 270,00 (duzentos e setenta reais) a partir do segundo centésimo, exclusive, até o terceiro centésimo, inclusive, maior que a meta;
- iv) R\$ 360,00 (trezentos e sessenta reais) a partir do terceiro centésimo, exclusive, para cada centésimo maior que a meta.

Cabe ao MDIC estabelecer os procedimentos para sua imposição das multas (BRASIL, 2013). A multa em função da eficiência do veículo pode ser observada na Tabela 133 e na Figura 161.

Tabela 133 – Multa em Função da Eficiência do Veículo

Consumo energético (MJ/km)	Eficiência a Gasolina (km/l)	Eficiência a Etanol (km/l)	Multa (R\$)
1,81	16,64	11,79	–
1,82	16,55	11,72	–
1,83	16,46	11,66	50
1,84	16,37	11,60	140
1,85	16,28	11,53	410
1,86	16,19	11,47	770
1,87	16,11	11,41	1.130
1,88	16,02	11,35	1.490
1,89	15,94	11,29	1.850
1,90	15,85	11,23	2.210
1,91	15,77	11,17	2.570
1,92	15,69	11,11	2.930
1,93	15,61	11,06	3.290
1,94	15,53	11,00	3.650
1,95	15,45	10,94	4.010
1,96	15,37	10,89	4.370
1,97	15,29	10,83	4.730
1,98	15,21	10,78	5.090

Fonte: Calculado com base em informações de BRASIL, 2013

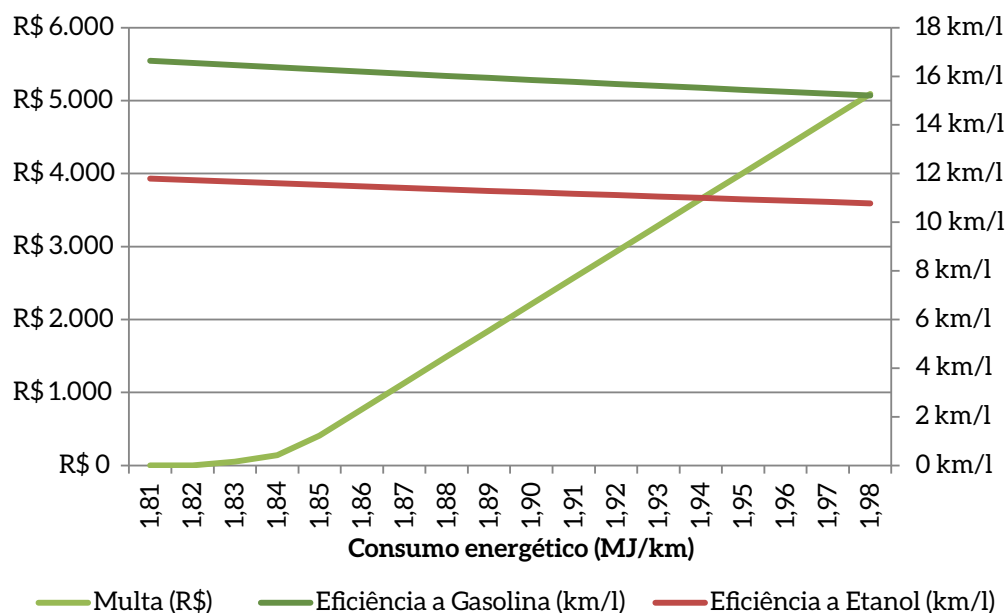


Figura 161 – Valor da Multa Prevista no Inovar-Auto em Função da Eficiência do Veículo

Fonte: Elaboração própria com base em informações de BRASIL, 2013

Nota-se, portanto, que a multa ultrapassa o valor de R\$ 5 mil para o caso de carros com eficiência de 15,21 km/l a gasolina e 10,78 km/l a etanol hidratado, o que representaria cerca de 20% do valor de um carro popular com preço próximo a R\$ 25.000.

Por fim, cabe mencionar que existem, ainda, outros aspectos tratados pelo programa. Há, por exemplo, condições específicas que, além da meta de eficiência, devem ser cumpridas para a habilitação ao programa. Previstas no art. 7º do Decreto nº 7.819 de 2012, as condições são (BRASIL, 2012):

- i)** Realizar, no país, indiretamente ou por terceiros, uma quantidade mínima de atividades fabris e de atividades de infraestrutura de engenharia definidas pelo decreto em pelo menos 80% dos veículos fabricados;
- ii)** Realizar, no país, dispêndios em pesquisa e desenvolvimento em percentuais mínimos definidos pelo decreto;
- iii)** Realizar, no país, dispêndios mínimos, definidos pelo decreto, em engenharia, tecnologia industrial básica e capacitação de fornecedores;
- iv)** Aderir a Programa de Etiquetagem Veicular definido pelo MDIC e estabelecido pelo Inmetro com percentuais mínimos (definidos em decreto) de participação dos modelos fabricados (ou seja, nem todos os modelos necessariamente deverão participar do programa de etiquetagem).

Dessas quatro condições específicas, a empresa habilitada deve cumprir três, sendo que a condição I é obrigatória (BRASIL, 2012). Logo, cabe ao empreendedor escolher duas das três condições restantes. Visto que a realização de testes para verificar o atendimento do nível mínimo de eficiência energética é uma condição geral obrigatória, é razoável assumir que a condição específica IV (aderir ao programa de etiquetagem veicular) será cumprida por todas as empresas que participarem do programa. Com essas condições, a adesão ao PBEV torna-se obrigatória às empresas que se habilitarem ao Inovar-Auto. Restaria às montadoras a escolha de atender à condição II ou III. É importante ressaltar também que não há exigência de que tais dispêndios previstos nos itens II e III tenham qualquer relação com o tema de eficiência energética.

8.1.1.6 COMPARAÇÃO ENTRE PAÍSES

A comparação entre programas de eficiência energética de diferentes países não é uma tarefa simples, pois depende de alguns fatores particulares a cada país: i) formato de política adotado (se é um padrão de eficiência, taxação de combustível, taxação da aquisição do veículo, taxação de uso do veículo etc.); ii) formato da meta (se é uma meta compulsória a todos os veículos, uma média ponderada pelas vendas por montadora, se é uma meta a partir da qual há benefícios fiscais etc.); e iii) valor da meta (que vai depender fortemente do ciclo de condução utilizado na medição da eficiência dos veículos).

A esse respeito, o International Council on Clean Transportation (ICCT, 2014b) realizou uma comparação entre os diferentes padrões de eficiência veicular existentes no mundo e a eficiência histórica dos veículos de cada país/grupo de países. Na Figura 162, linhas tracejadas representam metas já estabelecidas de forma oficial; linhas pontilhadas representam metas sob estudo ou propostas e ainda não oficializadas; e linhas cheias indicam o desempenho histórico. A unidade em que a eficiência está representada é litros por cem quilômetros (ou seja, quanto menor o indicador, mais eficiente a frota) e o ciclo de condução para o qual os valores foram convertidos é o europeu. A meta brasileira disposta na Figura 162 é a de habilitação ao Inovar-Auto, porém em outro ciclo de condução – o ciclo brasileiro se assemelha ao americano, que é menos exigente que o europeu (o mesmo veículo, se testado no ciclo americano e europeu, terá, em geral, uma eficiência medida maior no ciclo americano).

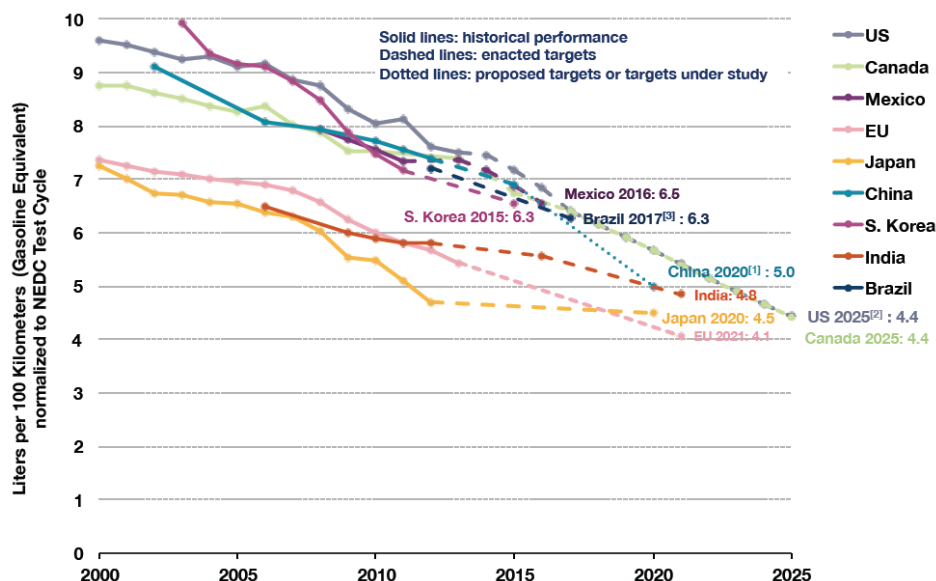


Figura 162 – Comparação Absoluta entre Padrões de Eficiência Veicular e Eficiência Histórica dos Veículos de Cada País

Fonte: ICCT, 2014b

Também é possível observar os padrões de forma relativa à frota existente e é isso o que a Figura 163 ilustra. Nela, o trecho acima do eixo horizontal (em tons de azul) indica a redução no consumo energético (emissões) específico(as) durante todo o período da política vigente em cada país. Abaixo do eixo horizontal, está apresentada a redução de consumo energético específico anual e, ao lado do nome de cada país, está o período em que tais reduções devem ser alcançadas.

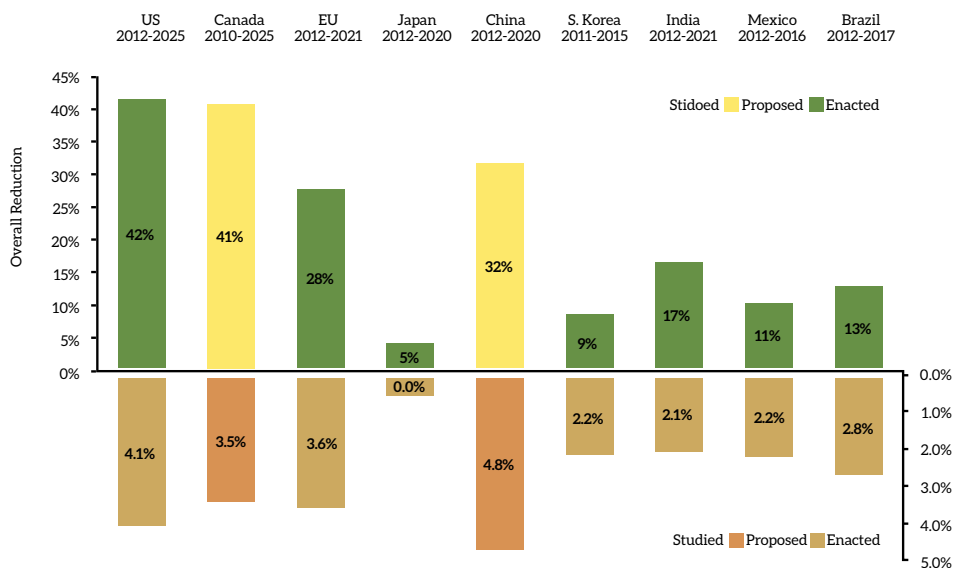


Figura 163 – Comparação Relativa entre Padrões de Eficiência Veicular de Cada País

Fonte: ICCT, 2014b

Nota-se, assim, que a redução anual média de consumo energético específico se apresenta maior para países em desenvolvimento. Por outro lado, são menos robustas que a meta chinesa, e a frota brasileira é significativamente menos eficiente que a coreana ou indiana (Figura 162). Além disso, a redução de consumo energético específico está aquém daquela de países desenvolvidos (à exceção do Japão, cuja frota é atualmente a mais eficiente do mundo).

Outra comparação interessante entre políticas é a agregação das medidas fiscais relacionadas à eficiência veicular. A esse respeito, o ICCT (2011a) avaliou as medidas relacionadas à eficiência dos veículos em sete países, seja essa relação direta (taxas e subsídios que variam diretamente com as emissões específicos de CO₂ ou o consumo de combustível do veículo) ou indireta (taxas e subsídios que variam com atributos do veículo – como cilindrada do motor ou tamanho do veículo – que estão relacionados à sua eficiência). O resultado pode ser observado na Figura 164 – a primeira coluna representa o preço implícito na política (em US\$ por grama de CO₂ por km), que é uma boa aproximação do custo marginal da eficiência energética definido pela política; a segunda coluna indica a amplitude de eficiência da frota desses países (em 2011); e a terceira indica se as medidas fiscais são diretas, indiretas ou uma combinação de ambas.

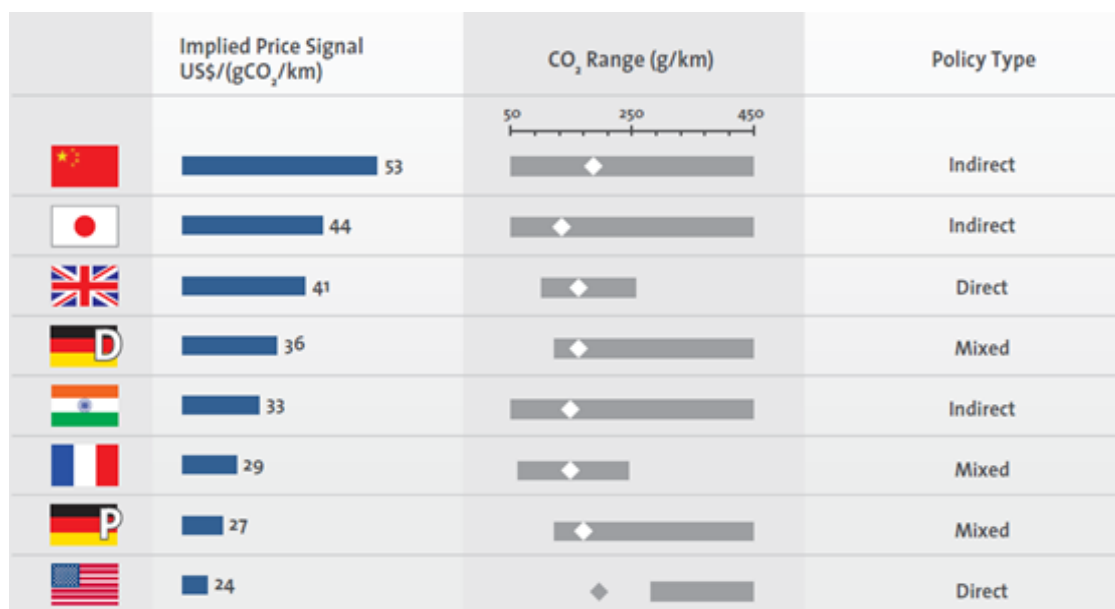


Figura 164 – Comparação entre Medidas Fiscais de Sete Países

Fonte: ICCT, 2011a

8.1.1.7 SÍNTESE DAS BARREIRAS E DOS COBENEFÍCIOS ASSOCIADOS À ADOÇÃO DE POLÍTICAS VISANDO À EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SETOR DE TRANSPORTES

O Quadro 22 resume, à luz da análise acerca de experiências internacionais e nacionais, as barreiras e os cobenefícios relativos à adoção de políticas de eficiência energética no setor de transportes.

Quadro 22 – Barreiras e Cobenefícios Relacionados à Adoção de Medidas de Eficiência Energética

Perfil	Barreiras			Cobenefícios		
	Políticas/ Econômicas	Técnicas/ Infraestrutura	Ambientais/ Culturais	Econômicos	Sociais	Ambientais
Passageiros	Elevação dos custos dos veículos	Infraestrutura: postos de recarga elétrica/ hidrogênio padronizados	Recursos minerais insustentáveis para tecnologias como baterias e células a combustível	Melhoria na segurança energética: diversificação	Benefícios a saúde pública dada a redução de poluentes atmosféricos	Benefícios ao ecossistema e biodiversidade dada a redução da poluição do ar
	Regulação insuficiente para padrões de emissões	<i>Lock-in</i> tecnológico	Informacional: consciência social sobre os benefícios da eficiência energética	Redução da dependência de petróleo: menor exposição a volatilidade dos preços do petróleo	Segurança nas estradas	Benefícios ao ecossistema e biodiversidade dada a redução da poluição sonora
	Veículos elétricos e baterias apresentam altos custos	–	–	Redução de custos operacionais no setor: combustíveis	–	–
	<i>Lobby</i> da indústria automobilística convencional: derivados de petróleo	–	–	Propagação tecnológica: baterias para eletrônicos	–	–
Carga	Redução de produtividade: maior tempo de deslocamento	<i>Lock-in</i> infraestrutura rodoviária: desestimula o transporte por outros modais	–	Melhoria na segurança energética: diversificação	Segurança nas estradas: redução de acidentes	Benefícios ao ecossistema e biodiversidade dada a redução da poluição do ar
	Oposição ao aumento de custos: barreira tarifária na aquisição de equipamentos	Falta de integração entre modais: baixa disponibilidade de terminais multimodais	–	Redução da dependência de petróleo	–	Menor uso do solo pela infraestrutura de transporte
	Suporte regulatório insuficiente	<i>Lock-in</i> tecnológico	–	Produtividade: redução de tempo de viagem	–	–
	Subsídio ao diesel estimula a compra de veículos mais baratos	–	–	Geração de emprego	–	–

Fonte: Elaboração própria

8.1.2 COBENEFÍCIOS, BARREIRAS E AS EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS E NACIONAL ASSOCIADAS A POLÍTICAS DE MUDANÇA MODAL

A mudança modal no transporte de passageiros e carga oferece possibilidades promissoras para a redução da intensidade energética de deslocamentos. Projetos como implementações de transporte de massa, por exemplo, podem deslocar parte da demanda do transporte individual para o transporte público, que consome menor quantidade de energia por passageiro-quilômetro percorrido (IPCC, 2014). Além disso, a mudança modal apresenta cobenefícios como melhorias na segurança energética a partir da redução da dependência do petróleo, bem como melhorias na produtividade, tendo em vista redução de congestionamentos nas cidades e estradas e, consequentemente, redução do tempo das viagens. Nesse sentido, podem-se alcançar melhorias na qualidade de vida da população por meio da maior segurança nas ruas, redução de acidentes de trânsito, maior acessibilidade e incentivos a programas culturais, principalmente em relação a compartilhamento de bicicletas, veículos elétricos e centros históricos para as pessoas. A geração de emprego também é fator importante em favor da mudança modal, principalmente quando se trata de transformações na matriz de transporte de carga. Benefícios ao meio ambiente também podem ser alcançados por meio da redução da poluição do ar, bem como menor uso do solo.

Contudo, a adoção de modais menos energointensivos não é um aspecto puramente comportamental, já que a oferta de infraestrutura de transporte adequada, como faixas exclusivas para ônibus nas cidades e ferrovias e hidrovias para transporte de carga, em muitos casos, depende de investimento público. Nesse sentido, uma das principais barreiras para investimentos no setor é a falta de densidade populacional, em algumas cidades, para permitir mais acesso aos serviços de mobilidade, que pecam em termos de disponibilidade e qualidade. Cabe ressaltar que existe oposição quanto ao aumento dos custos no transporte público, bem como oposição a restrições de estacionamento, os quais respondem, em grande parte, por congestionamentos em centros urbanos. A dependência de automóveis observada na população é um obstáculo para transformações urbanas e reforça a inércia no tocante à infraestrutura para bicicletas (ciclovias e má sinalização) e para caminhada (más condições de calçadas e má iluminação). Percebe-se também a descrença por parte dos órgãos públicos quanto ao valor da educação para a mudança comportamental da população. Mais especificamente para o transporte de carga, há o problema da intermodalidade, principalmente nas principais regiões comerciais do país. Ademais, a prevalência do frete rodoviário acaba desestimulando os demais modais, o que afeta, principalmente, a competitividade do modal ferroviário, que apresenta gargalos físicos e operacionais, bem como locomotivas com idade avançada.

No setor de transportes, o papel de uma autoridade supervisora é importante para o cumprimento dos planos de investimentos tanto para modelos regulatórios, em que não há competição, quanto em modelos *open market*. Nos casos em que não há competição, a autoridade é requerida para garantir que o operador monopolista ofereça os serviços de maneira padrão, em termos de cobertura, desempenho e qualidade. Além disso, o monopolista apresenta fracos incentivos para controlar custos, de modo que a autoridade deve ter o papel de intermediar com o governo a fim de quitar possíveis déficits operacionais. Num modelo de concorrência controlada para o mercado, a autoridade passa a ser responsável pelo planejamento e desenvolvimento de todos os serviços de transporte, incluindo todos os modais, ou seja, é de sua responsabilidade: planejar a infraestrutura de transporte e sistemas técnicos; definir cada rota na rede; ofertar serviços por meio de concursos e contratos; coordenar os

operadores do sistema; monitorar a conformidade dos contratos; definir as tarifas. Já num mercado aberto, a autoridade é requerida para manter e garantir padrões de segurança e ambientais, bem como assegurar a não ocorrência de organizações ilícitas, monitorando o setor. Mesmo assim, há claras distinções entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, como o uso de subsídios para o transporte público em cidades desenvolvidas, o que requer mecanismos administrativos sofisticados para assegurar sua alocação de forma eficiente, e a falta desse nível de capacidade em cidades em desenvolvimento, o que resulta em serviços de baixa qualidade (GIZ, 2004).

8.1.2.1 MOBILIDADE URBANA

As cidades são hoje o motor do crescimento econômico de muitos países, de modo que as oportunidades de emprego e os serviços públicos atraem as pessoas das áreas rurais e outras regiões. Para acomodar a demanda crescente por espaço residencial e comercial, as fronteiras urbanas são estendidas de forma quase sempre desordenada, principalmente nas cidades de países em desenvolvimento que apresentam altas taxas de urbanização. A infraestrutura de transporte frequentemente falha em atender as necessidades de mobilidade, e o uso crescente de veículos individuais contribui para congestionamento do tráfego, má qualidade do ar, saúde pública em declínio, segregação social e crescimento da pressão para implantar expansões rodoviárias dispendiosas. Nesse sentido, o planejamento tradicional de transporte, caracterizado por estimar o crescimento futuro baseado em tendências passadas, vem dando lugar a uma visão mais holística do termo urbano, reconhecendo que as decisões de investimento de uma cidade têm grande impacto no comportamento das viagens de seus residentes.

Há um grande número de medidas de custo relativamente baixo ou mesmo negativo que podem fazer parte de políticas voltadas à melhoria da mobilidade urbana, são elas:

- Incentivos econômicos:
 - » Tarifação de estacionamento: preços mais altos onde há alta demanda de estacionamento ou espaço público limitado;
 - » Tarifação rodoviária: tarifa de congestionamento por meio de pedágios nos centros urbanos.
- Medidas regulatórias:
 - » Gestão de estacionamento: definição clara das áreas de estacionamento e limitação ou redução da oferta de estacionamento;
 - » Regulações de construções amigáveis a pedestres e ciclistas: condições mínimas de acesso para pedestres e estacionamentos para ciclistas;
 - » Restrições físicas ao uso do carro: obstáculos, vias de sentido único, ruas fechadas artificialmente, zonas de pedestres;
 - » Padrões de projeto de integração intermodal;
 - » Melhorias para pedestres e ciclistas: limites de velocidade mais baixos, planejamento com foco em cruzamentos seguros, circulação segura e caminhos mais curtos para pedestres e ciclistas;
 - » Priorização do transporte público: sinalização de prioridade, faixas exclusivas para ônibus.

- Medidas infraestruturais:
 - » *Traffic calming*: diminuição das faixas de tráfego, lombadas e amortecedores de velocidade nos cruzamentos, projeto de ruas sinuosas;
 - » Otimização e aceleração do transporte público: corredores de transporte público fisicamente segregados, paradas de ônibus cobertas, faixas com pavimento elevado nos pontos de ônibus para acesso sem barreira, combinado com sinalização de segurança;
 - » Melhoria para os ciclistas: alocação de faixas de tráfego de automóveis para bicicleta, introdução de ciclovias.

A seguir, serão descritas as experiências internacionais e nacional relativas a políticas públicas visando à mobilidade urbana.

8.1.2.1.1 EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS

Muitos países ao redor do mundo adotaram estruturas políticas nacionais para incentivar as cidades a desenvolver planos de mobilidade urbana. Alguns deles usam abordagens de planejamento que focalizam predominantemente a provisão da infraestrutura para o veículo particular, enquanto outros reconheceram a necessidade de uma abordagem mais orientada para as pessoas, mas ainda estão explorando mecanismos para garantir a priorização da sustentabilidade. De acordo com Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ, 2014), planos de mobilidade urbana têm sido exigidos por governos federais, tendo em vista a implantação de uma política nacional de transporte coerente com metas de desenvolvimento globais. Muitos países não obrigam juridicamente os municípios a desenvolverem tais planos, mas sua elaboração tem facilitado o acesso a financiamento federal para projetos de transporte urbano de larga escala.

Nesse sentido, a Comissão Europeia adotou o Pacote da Mobilidade Urbana em 2013, com o intuito de partilhar experiências, mostrando as melhores práticas e fomentando a cooperação, bem como fornecendo apoio financeiro com foco na pesquisa e inovação de soluções para os desafios da mobilidade urbana. Ademais, promove-se o conceito de Planos de Mobilidade Urbana Sustentável (PMUS), que estimula a mudança para um transporte mais limpo e mais sustentável nas áreas urbanas, bem como diretrizes baseadas em amplo processo de consulta a planejadores profissionais, autoridades políticas e *stakeholders* de toda a Europa, o que mostra o quão desafiador e complexo é o planejamento da mobilidade urbana. Os principais países europeus que têm procedimentos similares ao PMUS são Inglaterra e Alemanha.

Na Inglaterra, as autoridades são obrigadas a desenvolver o Plano de Transporte Local (PLT) desde a publicação da Lei do Transporte, em 2000. Os PLT contêm políticas e planos de implementação, os quais devem ser renovados a cada cinco anos. Os ônibus urbanos são o elemento-chave dos PTL, de modo que as autoridades locais ganham certo poder para influenciar a provisão de serviços de qualidade, bem como garantir flexibilidade modal para a sociedade. Nesse sentido, as autoridades trabalham em parceria com os operadores de ônibus a fim de que o serviço seja capaz de operar pontualmente (UK/DFT, 2009). A estratégia política dos PLT está em consonância com os objetivos nacionais relativos ao setor de transportes. São eles:

- Fomentar o crescimento econômico: garantir a competitividade no setor de transportes e melhorar a regulação de forma a beneficiar tanto os produtores quanto os consumidores; reduzir a perda de produtividade ao melhorar a previsibilidade das rotas locais relacionadas à jornada de trabalho;
- Reduzir emissões de carbono;
- Promover equidade de oportunidades: aumentar a inclusão social por meio de melhorias de acessibilidade;
- Contribuir para melhorias na segurança no transporte, segurança pública e saúde: reduzir o risco de acidentes, bem como custos sociais e econômicos do setor de transportes relacionados à saúde pública;
- Melhorar a qualidade de vida e preservar o meio ambiente: minimizar os impactos do setor de transportes no meio ambiente e melhorar a contribuição do transporte para a qualidade de vida da população.

Ao elaborar o PLT, é importante que as autoridades locais determinem com clareza suas próprias estratégias, objetivos e prioridades, bem como as barreiras que devem enfrentar para alcançá-los (UK/DFT, 2009).

Em Londres, há uma autoridade voltada para o setor de transportes, a chamada Transport for London (TfL), responsável por implementar uma estratégia e gerenciar o sistema de transporte da capital inglesa. Ela é sucessora de cinco outras autoridades na história da regulação do transporte londrino, que teve início em 1933. A TfL é controlada por membros apontados pelo prefeito e é dividida em três principais diretorias, cada uma responsável por diferentes aspectos e modais de transporte. São elas:

- London Underground: responsável pela execução de rede metroviária metropolitana e pela gerência da prestação de serviços de manutenção pelo setor privado;
- London Rail: responsável pela coordenação dos operadores que provêm os serviços de trens nacionais dentro de Londres, bem como os serviços de bondes locais;
- Surface Transport: responsável pelo gerenciamento dos operadores da rede de ônibus urbano, bem como os serviços de transporte hidroviário, bicicleta, etc.

A visão da autoridade é criar um sistema de transporte que proporcione circulação segura, confiável e eficiente de pessoas e bens, de modo a contribuir para a economia, o meio ambiente e a inclusão social. O objetivo fundamental da estratégia é aumentar a conectividade, a capacidade do sistema de transporte público e, ao mesmo tempo, melhorar a eficiência e a integração de modais, priorizando deslocamentos a pé, de bicicleta e de transportes públicos. De acordo com Banister e Finch (2013), é na zona central de Londres que se concentram os grandes progressos no campo da mobilidade urbana. Atualmente, está em voga a reconsideração da prioridade para a utilização de espaços públicos, de modo que as ruas passaram a existir, primeiramente, para as pessoas poderem caminhar, relaxar e conversar, encorajando serviços comerciais locais a ocupar o mesmo espaço. Trata-se de um ingrediente essencial para uma cidade se tornar sustentável, pois as atividades se tornaram mais acessíveis e, havendo um transporte público de qualidade, não há necessidade de utilizar automóveis. Isso reduz o número de acidentes, bem como a necessidade de novos espaços ocupados por estacionamentos, liberando espaço para passeios públicos e ciclovias.



Figura 165 – Visão Aérea da Trafalgar Square em Londres

Fonte: CULTURA E VIAGEM, 2015

A rede de transporte público londrina é formada basicamente pelo sistema de ônibus urbano e pelo sistema metroviário de alta capacidade. O sistema de ônibus é visto como o mais flexível para se adaptar a crescentes níveis de demanda, o que significou dar prioridade a esse modal por meio de vias exclusivas e bem sinalizadas. Ademais, para garantir velocidade e confiabilidade, utiliza-se um sistema inteligente de bilhetagem, por meio de um cartão de integração do sistema de transporte local (BANISTER; FINCH, 2013). Parte dos argumentos para a introdução do pedágio urbano no centro de Londres, em 2003, foi a promoção de outras formas de deslocamento no local, já que o uso de automóveis na zona se tornou muito caro, incentivando a população a utilizar outros modais. De acordo com Banister (2005), essa medida reduziu em 20% os congestionamentos, aumentou em 20% o uso de transporte público e ciclovias e melhorou a qualidade do ar. Ressalta-se, no entanto, que sua eficácia tem se reduzido com o passar dos anos, embora os custos tenham aumentado. Seguindo a linha de cidades como Copenhague (Dinamarca), também foram construídas extensas ciclovias interligando os principais pontos de Londres, parte delas suplementada pela introdução de um sistema interligado de aluguel de bicicletas espalhado pela cidade (BANISTER; FINCH, 2013).

Na Alemanha, o Plano de Desenvolvimento do Transporte, chamado de Verkehrsentwicklungsplan (VEP), é o documento padrão de planejamento da mobilidade nos níveis municipal e regional. Seu principal objetivo é equilibrar o transporte urbano com foco especial nos requisitos sociais e ambientais, seguindo uma abordagem integrada para controlar e influenciar o desenvolvimento do transporte em uma região. Recentemente, a Associação Alemã de Pesquisa Rodoviária e de Transporte atualizou as diretrizes para a preparação de VEP, de modo a enquadrar a estrutura dos PMUS adotada pela União Europeia. Ao longo do tempo, os VEP transitaram de um foco no planejamento baseado em infraestrutura para uma visão mais holística de problemas de mobilidade. Os municípios alemães têm empregado com sucesso os instrumentos modernos com visão compartilhada para o sistema de mobilidade entre múltiplos *stakeholders*, o que facilita a elaboração de documentos amplamente aceitos com um conjunto eficaz de medidas.

Em Berlim, capital alemã, o transporte urbano experimentou diferentes fases de desenvolvimento desde a reunificação, em 1990. O desenvolvimento de infraestrutura era importante para fazer a ponte entre níveis de qualidade e conectar Berlim oriental com Berlim ocidental. Apesar dos grandes investimentos nas redes e na infraestrutura de transporte público, incluindo veículo leve sobre trilhos, metrô e trem regional, o uso do serviço público declinou enquanto o tráfego de automóveis aumentou. Sendo assim, o governo local identificou que a promoção de transporte público não era suficiente para influenciar positivamente os padrões de mobilidade, de modo que era necessária uma gestão apropriada do tráfego de automóveis para limitar seus impactos negativos na qualidade de vida urbana (GIZ, 2014). O processo de planejamento para uma nova estratégia de mobilidade resultou no Plano de Desenvolvimento do Transporte Urbano de Berlim, em 2002, e pode ser visualizada na Figura 166.

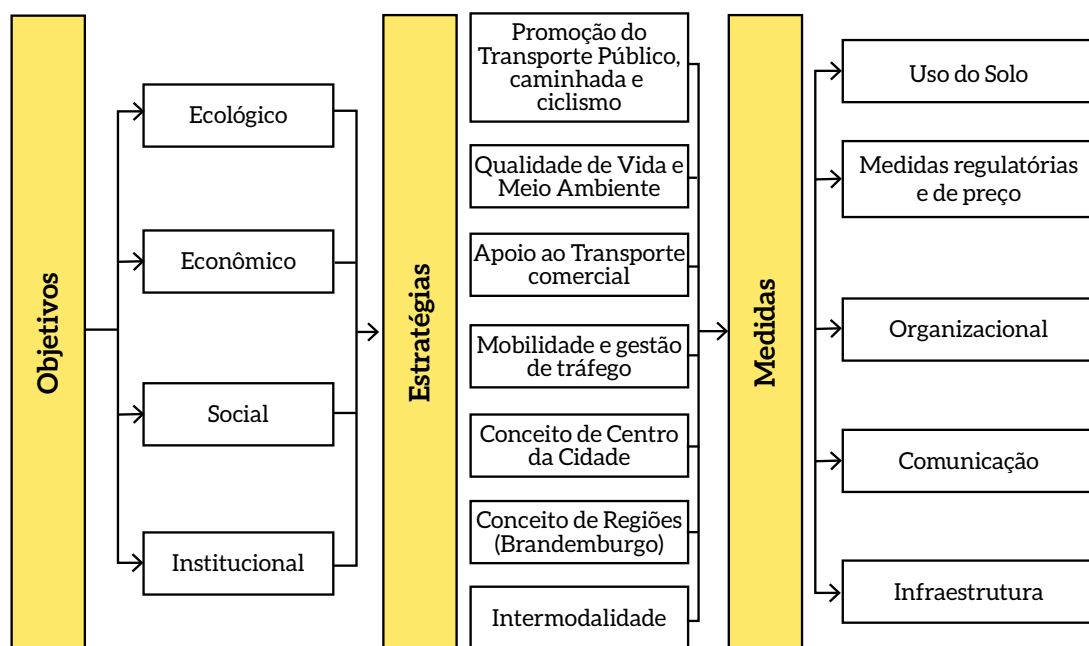


Figura 166 – Plano de Desenvolvimento do Transporte Urbano de Berlim

Fonte: GIZ, 2014

Tais medidas buscaram limitar o aumento do número e do tamanho das viagens, restringindo a expansão para a periferia e incentivando empreendimentos orientados para o transporte coletivo. Em detrimento de melhorias na infraestrutura, houve favorecimento de medidas organizacionais, como a sinalização de prioridade para modais de transporte público, sistemas dinâmicos de informação e gestão da mobilidade. Ademais, medidas para melhorar o transporte público e incentivar o uso de bicicleta e deslocamentos a pé buscaram realocar o espaço urbano no centro da cidade para apoiar uma mudança modal. Isso foi reforçado pelo fortalecimento da gestão de estacionamentos, por meio de elevações nas tarifas e limitação da disponibilidade de lotes. Dessa forma, no final dos anos 2000, percebeu-se reversão na tendência do uso de automóveis e aumento do uso do transporte público e dos modais bicicleta e a pé (GIZ, 2014).

Na América Latina, Bogotá (Colômbia) é reconhecida mundialmente por sua política de melhorias de mobilidade urbana e requalificação dos espaços públicos em um período curto de tempo. Antes de 2000, a cidade não dispunha de um sistema de transporte público adequado, em que ônibus de propriedade privada de diversos operadores estabeleciam um sistema de rotas e, embora não houvesse uma cultura automotiva tão forte, não havia qualquer política de preço para estacionamento nas ruas. Assim, a parcela da população que possuía automóveis estacionava em qualquer lugar, nas vagas em frente a estabelecimentos comerciais, ocupando, muitas vezes, as calçadas e reduzindo a segurança para os pedestres. De fato, nunca houve uma política de transportes na cidade antes de 1996, quando um estudo realizado por uma agência japonesa concluiu que a cidade precisava de um sistema de transporte de massa.

No entanto, apenas em 1998, no mandato do prefeito Enrique Peñalosa, é que se promoveu um novo paradigma de transporte na cidade. O plano de transporte contava com três grandes pilares: transporte de massa, ciclovias e restrição de circulação de automóveis. O primeiro passo fundamental foi a elaboração de um plano de transportes, em que se priorizou o desenvolvimento de um sistema de transporte de massa baseado em ônibus de alta capacidade. Esse sistema de *bus rapid transit* (BRT) foi implementado antes do fim do mandato do prefeito, de modo que a população pôde ver o projeto em funcionamento em um espaço relativamente curto de tempo e gerando impactos positivos na cidade, como apresentado na Figura 167. Atualmente, existe uma rede de mais de 84 km que possibilita o deslocamento de 1,6 milhão de pessoas por dia (GIZ, 2011).



Figura 167 – Sistema de BRT de Bogotá: TransMilenio

Fonte: CITY FIX, 2015

O segundo grande empreendimento da gestão Peñalosa foi o desenvolvimento de uma rede completa de ciclovias, de modo que a população poderia se utilizar da bicicleta de maneira segura na maioria ou até em todos os seus deslocamentos. A cidade já tinha tradição de uso da bicicleta, mas apenas como alternativa de esporte e lazer, de modo que, após a construção das ciclovias, alcançando a soma de 345 km, seu uso como meio de transporte aumentou de 0,58% das viagens para 4% em dois anos. Além da diminuição do espaço dos automóveis pela introdução de BRT e ciclovias, foi implementado um sistema de rodízio municipal chamado *pico y placa*, em que, de acordo com o final da placa e o dia da semana, alguns veículos não poderiam circular durante o horário de pico. O efeito imediato foi a redução dos congestionamentos e do uso geral do espaço viário pelos carros em 40%. Hoje em dia, a medida foi estendida para o dia inteiro, porém os motoristas têm optado pela aquisição de um segundo ou terceiro carro para resolver seus problemas de mobilidade, em vez de optar por outro modal (GIZ, 2011).

8.1.2.1.2 EXPERIÊNCIA NACIONAL

A crescente taxa de urbanização brasileira impõe diversos desafios aos gestores municipais, especialmente na questão da mobilidade urbana. Em 1940, três em cada dez brasileiros viviam em áreas urbanas. Atualmente, estima-se que 90% dos brasileiros vivem nessas áreas. Adicionalmente, o transporte de passageiros nas cidades brasileiras polarizou-se em direção às rodovias, privilegiado por políticas de Estado orientadas ao modal rodoviário e pelo nascimento da indústria automobilística local nos anos 1950. Na década de 2000, a melhoria do cenário econômico brasileiro, a expansão na oferta de crédito e o apoio crescente do governo federal à indústria automobilística fomentaram as vendas de veículos no Brasil. Assim, a conjuntura político-industrial, o crescimento populacional e o dinamismo econômico potencializaram a demanda por transporte individual e impulsionaram o crescimento da frota de veículos automotores, contribuindo para aumentar a pressão sobre a malha rodoviária existente.

A predominância do modal rodoviário no transporte de passageiros reflete-se tanto no transporte individual quanto no transporte coletivo de passageiros. No entanto, as condições precárias no transporte público, em particular nos grandes centros urbanos, têm estimulado o transporte rodoviário individual, que apresenta maior mobilidade no trajeto e flexibilidade em relação aos horários quando comparado ao transporte coletivo.

Depois de décadas sem investimentos em mobilidade urbana, muitos governos federais e municipais estão voltando a focar sua atuação na melhoria do transporte público, como forma de combater o impacto social, econômico e ambiental dos congestionamentos nas cidades. Essa é uma tendência positiva que deixa para trás a forma de desenvolvimento urbano adotada no final do século XX, mas que continua ainda hoje em muitas cidades, em que vias cada vez maiores dividem edifícios e quadras, abrindo espaço para um número cada vez maior de automóveis.

Como política nacional, o Brasil incentiva as cidades a desenvolver planos de mobilidade urbana (PMU), reconhecendo a necessidade de usar uma abordagem mais orientada para as pessoas. A Política Nacional de Mobilidade Urbana nacional foi revista em 2012, de modo que as cidades com população acima de 20.000 habitantes são obrigadas a fazer o PMU. Até 2015, mais de 3 mil cidades brasileiras têm de submeter seus PMU ao Ministério das Cidades, caso contrário, não recebem o financiamento federal para investimentos em transporte. Os PMU devem ser atualizados a cada dez anos (GIZ, 2014).

As diretrizes para preparação de PMU estão voltadas para a mudança transformacional em vez de intervenções que reforçam as tendências de mobilidade existentes centradas na propriedade e no uso de veículos motorizados particulares. São elas:

- Identificação de meios de reduzir o número de viagens feitas por carro particular e aumentar as viagens a pé e de bicicleta, esperando que as cidades sem transporte público priorizem o transporte não motorizado;
- Reduzir o consumo de energia e emissões de poluentes e de GEE locais;
- Melhorar a segurança, principalmente para grupos vulneráveis, como pedestres (idosos e crianças) e ciclistas.

O PlanMob (BRASIL/SEMOB, 2015) serve como orientação para a preparação dos PMU, dado que apresenta uma metodologia para o planejamento da mobilidade urbana, indicando um conjunto de ferramentas, medidas e políticas que podem ser adotadas pelas cidades. O PMU deve identificar objetivos para o sistema de transporte, abordando o transporte público não motorizado, a acessibilidade, os estacionamentos, os deslocamentos de bens e os meios de financiamento. Para construir as capacitações adicionais necessárias nas administrações locais, o Ministério das Cidades organiza cursos presenciais e a distância para planejadores, compatíveis com os requisitos da nova lei. Como o Brasil vai investir cerca de R\$ 140 bilhões no transporte urbano até 2020, os PMU destinam-se a apoiar a otimização dos financiamentos (GIZ, 2014).

Um dos casos mais emblemáticos do Brasil na área de mobilidade urbana é o da cidade de Curitiba (GIZ, 2004), que iniciou o processo de criação de um plano urbanístico ainda na década de 1940, com o Plano Agache, incluindo um sistema integrado de transporte público. Em sua decorrência, o Plano Preliminar de Urbanismo foi aprovado na década de 1960, juntamente com o Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC). A partir da implantação do Plano Diretor de Curitiba, no início dos anos 1970, o IPPUC assumiu a responsabilidade de determinar padrões para o uso mobiliário urbano e da comunicação visual na cidade. Os primeiros estudos mostravam preocupação com o crescimento da cidade – cerca de 5% ao ano. Esse crescimento exigia que Curitiba localizasse e identificasse suas ruas, sinalizando-as de forma adequada.

A implantação do sistema de transporte coletivo demandou estudos sobre o desenho dos ônibus. Foram propostas alterações de *design*, chassis, altura do ônibus; foram modificadas as portas de entrada e saída, os bancos foram adaptados para oferecer maior conforto aos usuários. E os terminais de transporte foram tratados para dar ao usuário conforto e informações sobre localização e itinerários dos ônibus.

O plano transformou a configuração radial da cidade para uma estrutura linear, designando cinco avenidas por onde a alta densidade residencial e comercial poderia se concentrar em zonas, de modo que as avenidas pudessem formar os principais corredores onde o sistema de transporte de alta capacidade funcionaria. As avenidas compreendiam um sistema rodoviário triplo, com a pista central destinada exclusivamente para ônibus expressos e, em paralelo, as pistas laterais destinadas ao trânsito local, uma em cada direção, conforme a Figura 168.

Caracterização de uma rede integrada



Prioridade do transporte coletivo sobre o individual

Ampla acessibilidade com o pagamento de uma única tarifa



Terminais de integração fechados

Integração com o uso do solo e sistema viário, configurando um crescimento linear



Terminais fora dos eixos ampliam a integração



Caracterização de corredores de transporte com 72km de canaletas, vias ou faixas exclusivas

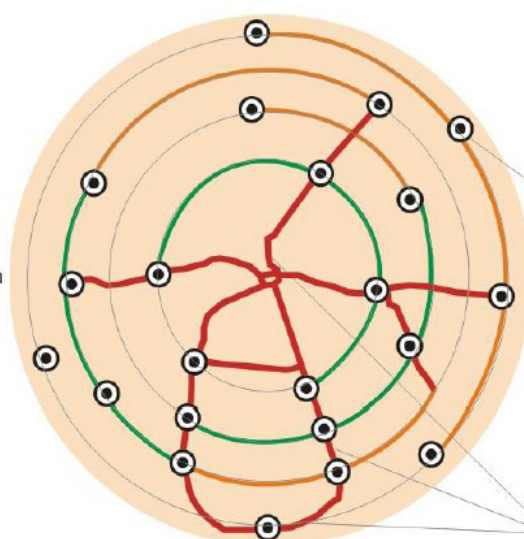


Figura 168 – Estrutura do Transporte Coletivo em Curitiba

Fonte: IPPUC, 2008

Esse sistema foi finalizado em 1982, época em que as altas taxas de urbanização demandavam melhorias de mobilidade na cidade. A Figura 169 apresenta a evolução do transporte coletivo entre 1974 e 2006.

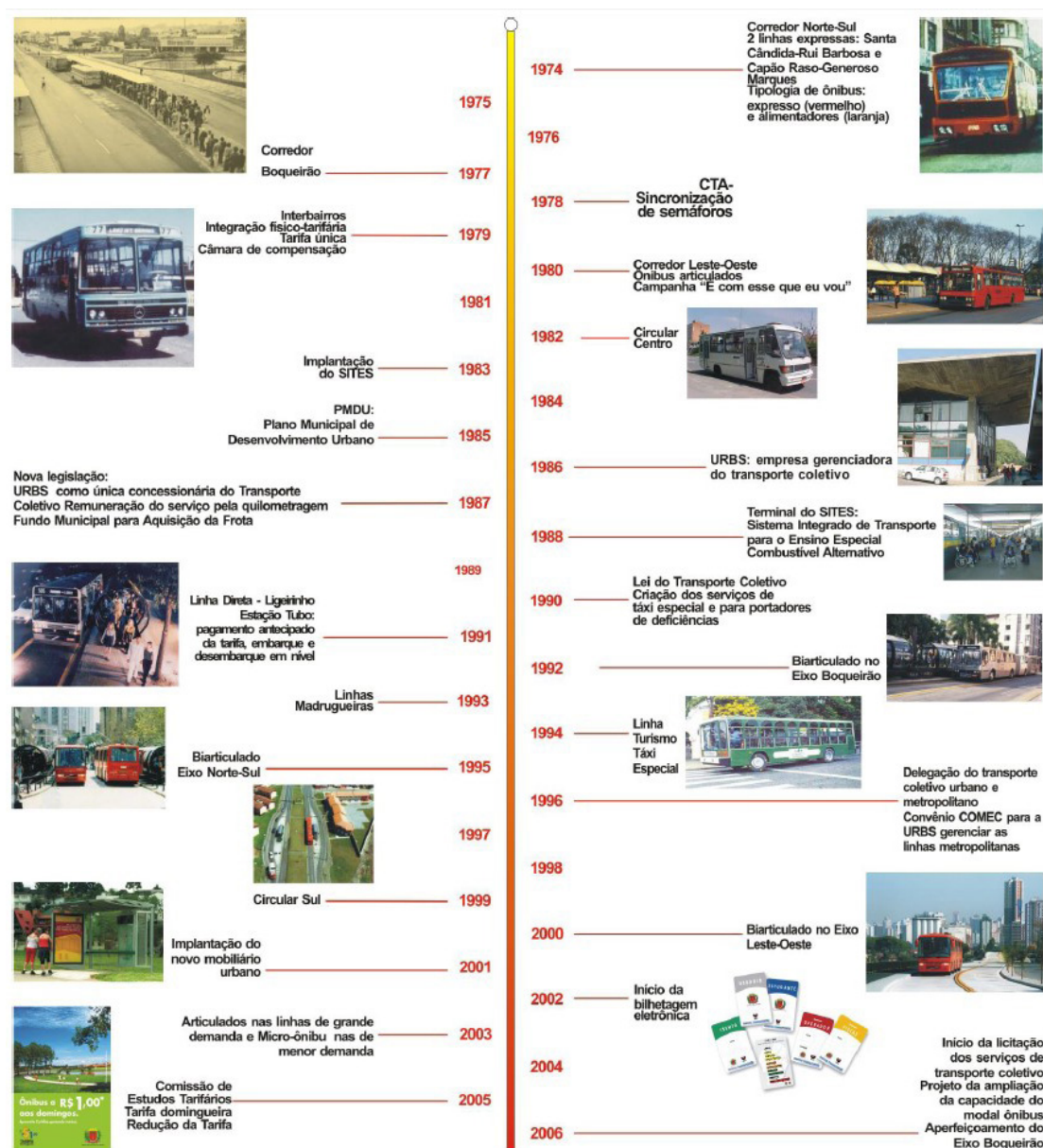


Figura 169 – Evolução do Transporte Coletivo em Curitiba (1974-2006)

Fonte: IPPUC, 2008

O Plano de Mobilidade Urbana de Curitiba (PlanMob Curitiba), criado em 2008, teve como objetivo principal estabelecer políticas, diretrizes e planos de ação para o cenário de 2020, com revisões periódicas, relativos à mobilidade urbana, objetivando promoção da cidadania e inclusão social, aperfeiçoamento institucional, regulatório e da gestão por meio de ações integradas de desenvolvimento urbano, de mobilidade e de proteção ao meio ambiente. O plano tem um enfoque metropolitano e se organiza em quatro temas:

- Acessibilidade: aperfeiçoar e ampliar a acessibilidade ao transporte coletivo tanto em relação à frota de veículos quanto aos terminais e pontos de parada;
- Circulação e sistema viário: promover a mobilidade urbana em Curitiba e suas conexões metropolitanas, de modo sustentável, induzindo a consolidação da malha viária urbana existente e priorizando os deslocamentos a pé, de bicicleta e de transporte coletivo;
- Sistema de transporte coletivo e comercial: promover a recuperação da prioridade e da atratividade do transporte coletivo sobre o individual a partir de adoção de políticas públicas, como a implantação de pistas e faixas exclusivas, aperfeiçoamento dos eixos de transporte coletivo e implantação do metrô;
- Sistema de transporte de cargas: identificar corredores viários e rotas obrigatórias e preferenciais para a circulação das cargas em Curitiba e região, bem como reservar áreas para implantação de centros de distribuição, em função de zoneamento e das novas necessidades do setor.

Atualmente, 70% da população de Curitiba utilizam diariamente o transporte público para ir ao trabalho. O total da rede de transporte cobre 1.100 km de ruas e avenidas, com 60 km dedicados para uso de ônibus. No sistema, há 25 terminais de transferência e 221 estações que permitem um embarque pré-pago. Em 28 rotas, há ônibus especiais equipados para transportar deficientes físicos.

O papel da prefeitura tem sido planejar, gerenciar e direcionar o sistema de transporte, inclusive o Sistema de Transporte de Massa é operado pela Urbanização de Curitiba (Urbs), empresa público-privada fundada em 1963. A Urbs goza de autonomia administrativa, acesso a importantes poderes, alguns benefícios fiscais e apresenta alta responsabilidade política. Suas funções são:

- Designar concessões para as dez empresas privadas de ônibus urbano operarem nas 256 rotas existentes;
- Definir tarifas e frequências mínimas;
- Executar o sistema computadorizado dos horários dos ônibus;
- Inspeccionar veículos para segurança da população;
- Construir e realizar a manutenção dos terminais de ônibus.

Dessa forma, os passageiros pagam uma única tarifa para entrar no sistema, o que permite ilimitadas transferências entre os serviços das dez empresas de ônibus existentes, as quais são divididas em zonas. Tais empresas são contratadas pela própria Urbs e têm como responsabilidade operar e manter os ônibus em pleno funcionamento dentro do sistema. A receita é somada para depois ser dividida entre os operadores do sistema, baseando-se no número de quilômetros rodados por cada tipo de veículo. Cabe ressaltar que o sistema opera sem qualquer subsídio governamental, dado que cada uma das empresas se vale de lucros operacionais. Além dessas transformações, o sistema de transporte de Curitiba é suportado por outras medidas, como:

- Há 150 km de ciclovias;
- Estacionamentos nas zonas centrais são bastante limitados e com restrição de tempo;
- Estacionamentos privados cobram altos preços;
- A maioria das empresas oferece transporte para seus empregados.

8.1.2.2 INFRAESTRUTURA PARA TRANSPORTE DE CARGA

No país, o modal rodoviário prevalece como o principal meio de transporte. Esse cenário atual é bastante notório no segmento de transporte de carga, no qual o transporte por rodovias é responsável por 52% da totalidade de toneladas-quilômetro movimentadas pelo país. Nesse âmbito, é imprescindível uma discussão sobre o desequilíbrio existente na distribuição da matriz de carga brasileira, que se torna mais evidente ao compará-la com as de outros países com dimensões territoriais semelhantes, conforme se pode observar na Figura 170.

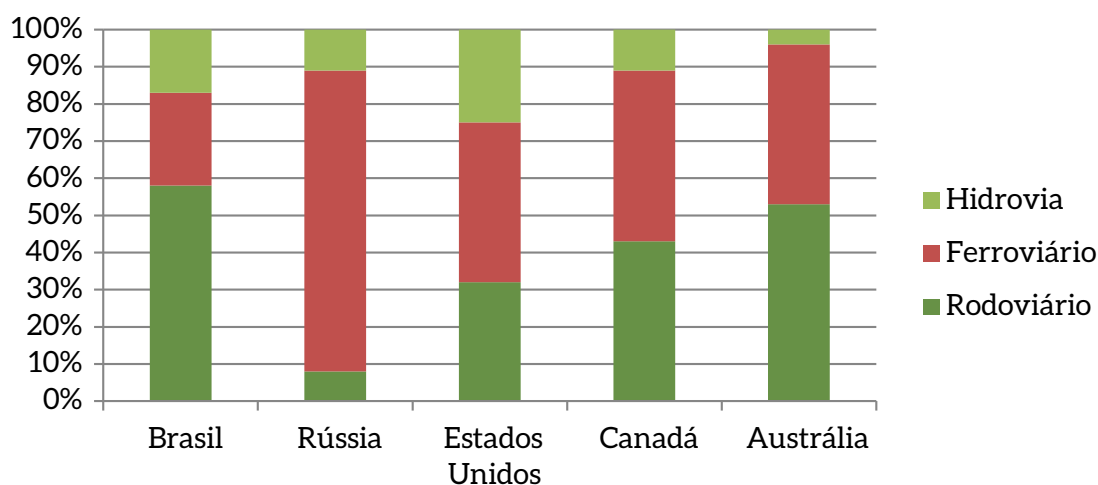


Figura 170 – Participação Relativa de Cada Modal⁶⁷ no Transporte de Carga por País⁶⁸

Fonte: BRASIL/SPNT, 2012

O transporte de passageiros também é prejudicado, pois a alta dependência de ruas e estradas limita a mobilidade da população, que não tem acesso fácil e de baixo custo a regiões mais remotas ou em trechos em condições precárias de pavimentação. Com isso, as diferentes regiões do país não são integradas, o que potencializa os congestionamentos e aumenta riscos de acidentes de trânsito.

A alta participação desse modal acarreta consumo elevado de combustível, já que, como mencionado no capítulo 1, uma frota de menor dimensão tem intensidade energética maior. Além disso, agrava a questão dos custos logísticos, levando o setor de transportes a representar 32% desses custos, percentual que poderia ser reduzido já que os fretes hidroviário e ferroviário chegam a ser 62% e 37%, respectivamente, mais baratos que os fretes rodoviários (BRASIL/SPNT, 2012), tratando-se de carregamentos de grandes volumes.

⁶⁷ Hidrovia ou hidroviário.

⁶⁸ Foi desconsiderada a participação do modal aéreo pela análise do PNLT.

Em contrapartida, os modais ferroviário e hidroviário têm eficiência maior (os valores de consumo por TKU no transporte hidroviário e na cabotagem são os menores dentre os modais) e adequação maior no perfil de transporte de bens de baixo valor agregado a grandes volumes e longas distâncias.

Desse modo, políticas de iniciativa pública em parceria com a privada desempenham papel vital no desenvolvimento da infraestrutura de outros modais e incentivo à utilização dessas alternativas de transporte, de modo a integrar de maneira mais eficiente os diferentes trechos e regiões do país.

A seguir, são apresentadas as experiências internacionais e nacional de políticas focadas na infraestrutura e melhoria nas operações dos modais ferroviário, hidroviário e aéreo, de modo a torná-los opções mais viáveis e competitivas para o setor de transportes.

8.1.2.2.1 EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS

a) Europa

A Comissão Europeia é o Poder Executivo da União Europeia, responsável por propor legislações e implementar decisões referentes ao mercado interno, emprego, investimento e união entre clima e energia. Nessa última esfera, há um eixo referente aos modais de transportes e seus respectivos programas e diretrizes para otimização das atividades e mitigação das emissões de poluentes provocadas por elas (EUROPEAN COMMISSION, 2015). As principais diretrizes para a evolução do transporte de carga no continente europeu são:

- Definição de planos estratégicos para o setor de transportes, envolvendo o desenvolvimento de um *roadmap* para a redução de até 60% na emissão de GEE do setor de transportes até 2050;
- Sistemas de transporte mais confiáveis e seguros;
- Promoção do uso de tecnologias mais eficientes e limpas para a rede de transportes;
- Política de infraestrutura que conecte o continente de oeste a leste, norte a sul, reduzindo as discrepâncias entre as diferentes redes de transportes dos países-membros da União Europeia – as quais dificultam o desenvolvimento de um mercado interno funcional –, e padronizando as malhas ferroviárias, que em muitos casos são incompatíveis entre si;
- Implementação de sistemas inteligentes de transportes, responsáveis por coletar informações e aplicar tecnologias de comunicação em todos os modais de transporte de passageiro ou carga, gerando mais empregos, aumentando a segurança, reduzindo congestionamentos e promovendo crescimento para o setor;
- Desenvolvimento da área de pesquisa e inovação para a criação de novas tecnologias e identificação de oportunidade de melhoria que proporcionem o aprimoramento contínuo do setor. O objetivo principal é criar uma área de pesquisa integrada na Europa, de modo a contar com a maior cooperação possível em todos os níveis e coordenação maior entre as políticas nacionais com as da União Europeia e, assim, aumentar a capacidade estrutural do setor de transportes;
- Aprimoramento da política de mercado internacional, promovendo padrões europeus de segurança e meio ambiente para outros países, principalmente vizinhos à União Europeia.

A Comissão Europeia tem como objetivo para transportes terrestres uma mobilidade que seja segura, eficiente e consciente ecologicamente. Dessa forma, para o modal rodoviário, a política da União Europeia consiste em promover serviços de transporte rodoviário de mercadorias e de transporte de

passageiros eficientes para criar condições similares para a concorrência, buscar estabelecer normas técnicas mais seguras e que respeitem mais o ambiente de modo a assegurar um grau de harmonização fiscal e social. A legislação em vigor aplicável aos serviços de transporte rodoviário pela União Europeia destaca os seguintes aspectos:

- Regras comuns sobre o acesso à profissão e ao mercado;
- Normas mínimas para o tempo de trabalho, tempo de condução e períodos de descanso para o transporte rodoviário profissional;
- Taxas de imposto anuais mínimas para veículos;
- Regras padronizadas para portagens e direitos de utilização de veículos pesados de mercadorias;
- Correspondência entre pesos e dimensões máximos dos veículos rodoviários;
- Aumento do número de áreas de estacionamento seguras ao longo da rede rodoviária transeuropeia.

Para o modal ferroviário, os esforços da Comissão Europeia concentraram-se em três grandes áreas cruciais para o desenvolvimento de uma indústria de transporte ferroviário forte e competitiva: abertura do mercado do transporte ferroviário à concorrência, melhoria da interoperabilidade (compatibilidade técnica) e da segurança das redes nacionais e desenvolvimento da infraestrutura de transportes ferroviários.

No que diz respeito à infraestrutura, a grande preocupação da Comissão Europeia se refere à construção de uma rede transeuropeia de transportes (RTE-T) com base na interconexão e operação entre as redes nacionais de transporte, o que inclui o modal ferroviário, e é de grande importância para a competitividade econômica da União Europeia e para seu desenvolvimento equilibrado e sustentável. Como parte do programa RTE-T, coordenadores europeus têm a tarefa de facilitar a execução de determinados projetos ferroviários de vários países vistos como alta prioridade para o desenvolvimento dessa rede.

Uma das metas estabelecidas para o modal é implementar o sistema de gerenciamento do tráfego ferroviário europeu – European Railway Traffic Management System (ERTMS) – nos seis corredores correspondentes, os quais estão cobrindo um número de rotas de transporte de mercadorias importantes, entre 2015 até 2020. Essas seis rotas são responsáveis por cerca de um quinto do tráfego ferroviário de mercadorias da Europa.

Na Europa, a demanda pelo transporte aéreo tem previsão de crescer 5% ao ano até 2030. Para suportar esse crescimento, a prioridade máxima é de aumento da segurança durante as operações. A meta da União Europeia é ter as políticas de aviação mais seguras do mundo. Para explorar o potencial econômico provindo dessa demanda crescente, a Comissão Europeia também se preocupa com alguns aspectos:

- Mercado unificado: lida com as dificuldades da liberação gradual do mercado de aviação após décadas de restrições, o que cobre licenciamento das transportadoras, tarifas e acesso ao mercado etc. após décadas de restrições que limitaram o mercado do transporte aéreo;
- Aviação externa: desenvolvimento gradual de uma política externa de aviação mais coordenada;
- Espaço aéreo europeu: redução dos congestionamentos que provocam atrasos em voos;
- Sesar: desenvolvimento do Programa Sesar, que gerencie o tráfego aéreo e aumente a eficiência de transporte pelo aumento da capacidade.

Para o modal hidroviário, o objetivo da Comissão Europeia é a implementação de regras de segurança rígidas que impeçam o transporte abaixo do padrão requerido e reduzam o risco de acidentes marítimos graves e impactos ambientais provocados pelo transporte marítimo. A Comissão Europeia trabalha também ativamente contra a pirataria e ameaças de terrorismo. Outra atividade importante diz respeito à dimensão social, cuidando de condições de trabalho, saúde e segurança e qualificações profissionais dos marítimos. Finalmente, a Comissão Europeia trabalha para a proteção dos cidadãos enquanto utilizadores de serviços de transporte marítimo, garantindo condições de segurança, prezando seus direitos como passageiros e examinando a adequação dos serviços públicos de transporte marítimo propostos pelos Estados-membros.

b) Austrália

Outro caso de análise é referente à Austrália, país com dimensões territoriais equiparáveis às do Brasil, porém com um sistema de transportes mais evoluído e adequado a essa extensão territorial. Grande parte dessa afirmação se atribui ao fato de a matriz de carga ter maior participação ferroviária, responsável por 48,5% das toneladas-quilômetro transportadas, seguido pelo modal rodoviário, com 34,6%. O transporte marítimo movimenta 16,8% do total da carga, enquanto 0,1% é destinado ao modal aéreo (AUSTRALIAN GOVERNMENT, 2014).

Os programas de infraestrutura em transporte na Austrália podem ser encontrados em domínio do Departamento de Desenvolvimento Regional e em Infraestrutura (AUSTRALIAN GOVERNMENT, 2015), apresentados para os modais rodoviário, ferroviário e aéreo.

Para o desenvolvimento do modal rodoviário, o programa de investimento em infraestrutura australiano foca nos seguintes componentes:

- Rede nacional de conexões entre as principais rodovias bem definida;
- Plano nacional de transporte terrestre de modo a integrar e aprimorar a rede nacional de transportes por parte do governo;
- Política de financiamento único para a rede nacional de transportes, definida por diversos projetos nacionais;
- Financiamento para melhorias nos transportes locais e regionais, incluindo:
 - » Recuperação de rodovias;
 - » Programa Black Spot, responsável por reduzir a quantidade de acidentes de trânsito;
 - » Programa para segurança e produtividade de veículos pesados;
 - » Programa de gestão inteligente para autoestradas nacionais;
 - » Projetos de desenvolvimento e inovação em transportes;
 - » Programa de renovação de pontes;
 - » Programa de aprimoramento das estradas nacionais.

A Austrália se depara com o desafio de desenvolver sua infraestrutura ferroviária para atender a atividade de carga que tem a previsão de dobrar nos próximos 20 anos. Desse modo, o governo investe na infraestrutura que possa aumentar a produtividade e oferecer apoio ao transporte de carga ferroviário. A maior parte dos projetos é referente à construção ou reparação de trechos da malha ferroviária, com apoio das concessionárias em atividade:

- Melbourne: construção da Inland Railway, entre as cidades de Melbourne e Brisbane, por parte do governo nacional. A construção desse trecho compreende um planejamento detalhado do corredor, aspectos ambientais e consulta à comunidade, atendendo a um desenvolvimento de transporte sustentável, que é foco dos programas nacionais. Esse novo trecho terá capacidade para atender ao mercado da costa leste para os próximos 50 anos em diante;
- Australian Rail Track Corporation (ARTC): entidade criada pelo governo australiano em 1998 para gerenciar e desenvolver a infraestrutura do trecho interestadual como entidade única, por meio de apropriação ou arrendamentos de longo período desse trecho;
- Terminal de carga intermodal de Moorebank: o governo australiano está trabalhando na entrega de uma grande instalação intermodal no sudoeste de Sidney para fornecer um traslado ferroviário entre Port Botany e Moorebank, um terminal separado para o frete interestadual e armazenagem. A escolha do local foi estratégica para o aumento da capacidade intermodal que atenda a centros logísticos no sudoeste de Sidney. Para esse projeto, o governo reconhece que o setor privado é melhor para planejar, construir e operar o terminal.

São dois os principais programas para o transporte aéreo na Austrália:

- Programa para redução do ruído provocado pelas atividades de aviação nos aeroportos de Sidney e Adelaide que contou com a assistência a diversas propriedades públicas e residenciais nos entornos;
- Aviação regional e remota: o governo australiano fornece apoio específico para a infraestrutura de aeródromos e serviços aéreos para áreas remotas onde não são comercialmente viáveis. Esse financiamento é de responsabilidade do Programa de Acesso da Aviação Regional (RAAP).

O RAAP também presta assistência ao financiamento para melhorias no acesso e segurança para aeródromos remotos, bem como voos subsidiados para garantir que moradores de comunidades remotas tenham acesso a centros de serviços regionais. Os componentes de financiamento do RAAP são:

- Esquema de subsídios a serviços de aviação remoto (RAAS);
- Programa de melhoria de pista remoto (RAU);
- Programa de inspeção de aeródromos remoto (RAI).

Tradicionalmente, os serviços de aviação regional foram identificados como as companhias aéreas que prestam serviços regulares de transporte público e cujas frotas de aeronaves têm exclusivamente baixa capacidade (38 assentos ou menos ou com carga de 4.200 kg ou menos). No entanto, as companhias aéreas regionais da Austrália geralmente usam aviões maiores. Algumas áreas regionais apresentam serviços prestados por aviões a jato operados por grandes companhias aéreas nacionais. A Constituição australiana dá aos governos estaduais e territoriais poder sobre a aviação regional, uma vez que é em grande parte uma questão de comércio intraestadual.

8.1.2.2.2 EXPERIÊNCIA NACIONAL

a) Programa de Aceleração do Crescimento (PAC)

O PAC foi criado em 2007, durante o governo Lula, com o intuito de promover a retomada do planejamento e execução de grandes obras de infraestrutura social, urbana, logística e energética do país, contribuindo para o seu desenvolvimento acelerado e sustentável (BRASIL/MP, 2015a).

A partir de 2011, foi implementada a segunda fase, passando a ser chamado de PAC 2, incorporando mais ações de infraestrutura social e urbana no programa. O PAC 2 vem, então, realizando obras de infraestrutura para cumprir as metas traçadas para diferentes eixos da economia. São seis eixos contemplados pelo programa: Cidade Melhor; Comunidade Cidadã; Minha Casa Minha Vida; Água e Luz para Todos; Transportes; e Energia (BRASIL/MP, 2015).

No eixo de transportes, os investimentos são atribuídos à infraestrutura de rodovias, ferrovias, aeroportos e hidrovias brasileiras, otimizando o escoamento da produção e garantindo a segurança dos usuários. Também estão inseridos nesse eixo o PAC Comunicação, que objetiva ampliar o acesso à internet em áreas remotas e melhorar a segurança na comunicação de dados e a interconectividade da rede brasileira com outros países, e o PAC Defesa, que compreende objetivos estratégicos das Forças Armadas.

O subeixo de transportes com o maior volume de empreendimentos é o rodoviário. As 340⁶⁹ obras listadas têm o intuito de expandir o sistema rodoviário – manutenção, segurança, estudos e projetos. São obras de duplicação, pavimentação, acesso a portos, contornos e travessias urbanas, de modo a eliminar o estrangulamento em eixos estratégicos, desenvolver novas regiões, ampliar a integração física a países vizinhos, reduzir custos logísticos, aumentar a segurança e qualidade no tráfego, reduzir acidentes e garantir a carteira de projetos para investimentos no setor para a integração com outros modais (ferrovias e hidrovias) e concessão de rodovias com grande volume de tráfego. Dos empreendimentos listados em balanços do PAC, 59 encontram-se até o momento com o *status* concluído.

Uma das grandes metas do PAC para o setor de transportes é expandir a malha ferroviária de modo a permitir a ligação entre áreas de produção agrícola e mineral a portos, indústrias e mercado consumidor. Assim, poder-se-ia criar um ambiente mais competitivo no transporte de cargas e estimular o uso da malha ferroviária e a criação de novos empreendimentos. Uma melhor utilização da malha também permitiria integração intermodal, com rodovias e hidrovias. No perfil de transporte de passageiros, também compreende investimentos no TAV, ligando grandes metrópoles brasileiras. Dos 27 empreendimentos traçados pelo PAC, três encontram-se concluídos.

Para o subeixo hidrovias, o programa pretende ampliar e melhorar a navegabilidade dos rios para diminuir o custo do frete, aumentar a segurança e planejar o crescimento da navegação pelos rios brasileiros. Existem 47 empreendimentos voltados para atender esse subeixo, apenas um com *status* concluído atualmente, o terminal hidroviário de Eirunepé, no estado do Amazonas.

O investimento nos portos brasileiros tem o objetivo de ampliar, modernizar e recuperar as estruturas de modo a reduzir os custos logísticos, proporcionar maior eficiência nas operações e promover aumento da competitividade das exportações e incentivo ao investimento privado. Compreende obras de dragagem de aprofundamento de infraestrutura portuária, de inteligência logística e de terminais de passageiros. Atualmente, há 55 empreendimentos do PAC listados para melhoria da infraestrutura em portos, estando três concluídos.

⁶⁹ A quantidade de empreendimentos para cada subeixo apresentada pelo presente estudo refere-se ao número exibido pelo site do PAC <<http://www.pac.gov.br/infraestrutura-logistica/>> para cada subeixo dentro do setor de transportes. Esses valores nem sempre são os mesmos que os exibidos por balanços anteriores do PAC. Quando surgem novos empreendimentos, alguns são abandonados e outros são acoplados.

O último subeixo relacionado ao transporte de carga dentro do eixo de infraestrutura logística é o de aeroportos. Prevê-se a expansão da capacidade aeroportuária brasileira, ampliando ou construindo novos terminais, tanto de carga quanto de passageiros, reforma e construção de pistas, pátios, torres de controle e modernização dos sistemas operacionais. São 44 obras, três em estado de conclusão.

b) Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT)

Um documento criado pelo governo foi o PNLT, plano de metas e previsão para o setor de transportes elaborado pela Secretaria de Política Nacional de Transportes (SPNT), do Ministério dos Transportes (MT). Foi criado com o intuito de servir como diretriz na tomada de decisões ligadas ao setor de transportes no Brasil. Premissas e resultados foram utilizados por muitos estudos posteriores sobre análise logística da matriz de carga brasileira (BRASIL/SPNT, 2012).

O PNLT é um plano que objetiva “orientar, com embasamento técnico e científico, a implantação das ações públicas e privadas no setor de transportes de forma a atender às demandas políticas de integração, desenvolvimento e superação de desigualdades”. Dessa forma, o PNLT é um plano de otimização do setor de transportes, visando a uma transformação na matriz que apresente participações mais equilibradas dos modais.

O PNLT foi lançado em 2007, com projeções muito otimistas para o transporte de carga no Brasil, prevendo equiparação entre as participações dos modais rodoviário, ferroviário e aquaviário. O relatório revisado foi divulgado em 2012 e traz como base o ano de 2011. O principal resultado dessa revisão das metas estabelecidas no PNLT é a atualização do portfólio de investimentos.

Para a construção desse portfólio, foram levantados mais de mil projetos. Removidas todas as duplicidades e intervenções passíveis de serem agrupadas em um único projeto, o resultado foi uma listagem de 1.167 projetos. Nesses projetos estão compreendidos os pleitos registrados junto à SPNT, projetos não implementados de versões anteriores do PNLT e a relação dos projetos de empreendimentos de infraestrutura regional de transportes constantes do PAC.

Porém, nem todos esses 1.167 projetos tinham passado por uma análise que comprovasse sua viabilidade ou definisse prioridade de aplicação de investimentos. Para isso, foram realizados estudos macroeconômicos e de demanda de transportes (incluindo transporte de carga e de passageiros) para identificação dos principais fluxos de origem-destino entre todas as regiões, além de estudos de oferta para levantamento da atual rede de transportes existente no país.

Após esses estudos, foram realizadas simulações de impactos das demandas futuras na rede viária multimodal – por meio da identificação de produtos relevantes na demanda por transporte –, obtendo-se estimativas dos carregamentos ou fluxos por segmento viário para diferentes anos futuros. Esse processo resultou em um diagnóstico da situação inicial, contemplando a matriz de transporte de carga de 2011 e uma visão preliminar do futuro projetado e desejado.

A análise de viabilidade realizada pelo PNLT foi de caráter econômico, utilizando o critério de taxa interna de retorno (TIR). Dessa forma, os 1.167 projetos compreendidos no Portfólio de Projetos 2011 do PNLT foram classificados da seguinte maneira:

- 111 projetos foram definidos como prioritários em função de sua maior viabilidade econômica, ou seja, obtiveram uma TIR maior ou igual a 8% ao ano;
- 237 projetos foram denominados “projetos sociopolíticos” devido à sua menor viabilidade econômica, mas foram incorporados no escopo de análise, pois apresentam outros aspectos que não os de avaliação econômica, como interesses e valores sociopolíticos, ambientais, tecnológicos ou de desenvolvimento regional;
- 231 são oriundos do PAC e não foram avaliados por já apresentarem datas previstas de implementação, porém foram considerados na rede de simulação no ano em que sua implantação é prevista;
- 588 projetos não foram avaliados por não haver informações completas, ou devido à impossibilidade de georreferenciamento ou de simulação segundo a metodologia considerada no plano.

Dessa forma, considerando a implementação dos 579 projetos simulados pelo PNLT (PAC, projetos prioritários e sociopolíticos), o plano foi capaz de projetar qual é a quantidade de carga a ser transportada por modal.

c) Programa de Investimentos em Logística (PIL)

O PIL foi lançado em 2012 pelo governo para integrar e dinamizar o setor de transportes brasileiro. Esse programa busca atrair investimentos públicos com parcerias da iniciativa privada para criar um sistema de transportes moderno e eficiente por meio de um conjunto de projetos voltados para atender à infraestrutura exigida por cada modal.⁷⁰ O programa é regido seguindo três diretrizes: ampla e moderna rede de infraestrutura, cadeia logística eficiente e competitiva e modicidade tarifária. Os dados referentes à primeira etapa do programa para cada modalidade são apresentados a seguir:

- Rodovia: o programa orçou um investimento de R\$ 46 bilhões em rodovias. Nessa linha, há um sistema de concessões de rodovias que prevê a execução de obras de duplicação que deverão ser concluídas durante os primeiros cinco anos de contrato. Os bancos públicos brasileiros poderão financiar até 70% do investimento a uma taxa de juros de até 2,0% ao ano mais a Taxa de Juros de Longo Prazo (TJLP). Um ponto de destaque das concessões é que primeiro o usuário recebe os benefícios, com 10% das duplicações concluídas, e depois a tarifa de pedágio passa a ser cobrada;⁷¹
- Ferrovia: deseja-se quebrar o monopólio na oferta de serviços de transporte ferroviário e redução de tarifas de modo a torná-lo uma alternativa mais viável. Para tal, serão concedidas ferrovias de bitola larga, ou seja, com maior capacidade para o transporte de carga, traçado geométrico otimizado e velocidade elevada. A Valec comprará a capacidade integral de transporte da ferrovia e fará a oferta pública, assegurando o direito de passagem dos trens em todas as malhas e buscando a modicidade tarifária;
- Portos: lançado em 2012 com orçamento de R\$ 54,6 bilhões (e investimento adicional de R\$ 6,4 bilhões para acessos marítimos e terrestres) para os cinco anos seguintes, propõe modernizar e ampliar a infraestrutura portuária no Brasil. Para tal, conta com as seguintes diretrizes: planejamento sistêmico, ganhos de escala, licitações por maior capacidade de movimentação com menor tarifa e/ou menor tempo de movimentação, aumento da concorrência, reorganização dos portos, planejamento de longo prazo;
- Aeroportos: tem o objetivo de melhorar a qualidade dos serviços e a infraestrutura aeroportuária para os usuários, ampliar a oferta de transporte aéreo à população brasileira e reconstruir a rede de aviação regional. Para tanto, conta com investimentos superiores a R\$ 7,3 bilhões em 270 aeroportos.

⁷⁰ Disponível em: <<http://www.epl.gov.br/programa-de-investimentos-em-logistica-pil>>. Acesso em: 15 de out de 2014.

⁷¹ Disponível em: <<http://www.epl.gov.br/programa-de-investimentos-em-rodovias>>. Acesso em: 15 de out de 2014.

d) Plano Hidroviário Estratégico (PHE)

Para aprimorar o fluxo de cargas e passageiros pelas hidrovias brasileiras e aumentar a participação do modal hidroviário em uma matriz de transportes integrada, foi instaurado em 2012 um plano pelo Ministério dos Transportes, o PHE. O horizonte de tempo do plano vai até o ano de 2031 e teve como ponto de partida a elaboração do PNLT em conjunto com o PNIH, elaborado pela Antaq.

Enquanto o PNIH foca em diferentes localidades para a implantação de terminais hidroviários interiores para desenvolver bases de dados para terminais e identificar rotas e cargas transportadas, o PHE atua de forma mais abrangente, complementar ao PNIH, por meio de análise institucional e econômica do sistema físico dos rios e da legislação de transporte e indicando medidas e investimentos necessários para a melhoria da navegabilidade dos rios e estruturação do subsetor. Dessa forma, o PHE representa um ponto de partida para o desenvolvimento do transporte hidroviário interior (THI) (BRASIL/MT, 2013c). A visão do PHE se baseia em quatro elementos:

- Fortalecimento do transporte hidroviário interno: melhorando esse sistema, há aumento da competitividade dos produtos brasileiros no mercado internacional de modo a impulsionar a economia brasileira. Deseja-se promover melhor estruturação do THI para atender a demanda crescente de transporte de carga a granel, principalmente a portos para exportação;
- Identificação dos usuários: de modo a facilitar a utilização das hidrovias por parte dos usuários atuais. Um melhor funcionamento das operações de empresas que operam atualmente poderia estimular outros fluxos de carga de longa distância ou de base regional a serem transportados por hidrovia;
- Estruturação da rede de forma gradual: ações de melhoria da navegabilidade, priorizando rotas que precisam ser desenvolvidas com urgência para usuários em potencial;
- Desenvolvimento conjunto da rede: leva em consideração o compromisso das partes interessadas para a implantação de um plano conjunto.

Por meio de uma análise do sistema hidroviário brasileiro, foi possível avaliar e chegar a um diagnóstico da situação atual. A análise foi realizada em nível macro e regional, considerando elementos como o sistema físico dos rios, aspectos socioambientais, aspectos econômicos, o sistema de transporte e governança.

Após o relatório de avaliação e diagnóstico, foi criado o relatório de elaboração e avaliação de estratégias cujo objetivo é apresentar os planos estratégicos para o transporte hidroviário até o ano de 2031. Para tanto, houve uma seleção de rios e trechos para navegação comercial, os quais deveriam ser priorizados pelo plano.

Desse modo, identificaram-se oportunidades de crescimento das atividades hidroviárias. Para o transporte de carga, o relatório afirma que a produção de soja e milho, duas das principais culturas agrícolas do Brasil, tende a continuar em expansão até 2031. A importação de *commodities*, por exemplo, de fertilizantes, também crescerá, e o transporte hidroviário interior de produtos químicos, petróleo e carvão aumentará significativamente. Além disso, alguns projetos apresentam grande potencial para impulsionar o desenvolvimento do transporte hidroviário interior, visto que compreendem a construção de novas indústrias e operações próximas às hidrovias com o objetivo de se beneficiar com um modo de transporte mais barato e confiável.

Atualmente, a Região Amazônica é onde ocorre o maior transporte de passageiros. São cerca de seis milhões de passageiros percorrendo longas distâncias, com previsão de aumento de 40% nesse número até 2031. Os serviços de curta distância (balsa) também são importantes nessa área, com número igual de passageiros. Já o transporte de longa distância nessa região está diretamente relacionado à densidade da rede fluvial naturalmente disponível e ao limitado alcance das malhas rodoviária e ferroviária.

Além do transporte de carga e passageiro, o plano se preocupa em abordar aspectos relacionados à projeção de condições de navegabilidade, aspectos socioambientais, estrutura institucional, aspectos de regulamentação, sistema de gestão hidroviária e intermodalidade.

e) Plano Nacional de Integração Hidroviária (PNIH)

Criado pela Antaq, tem por objetivo realizar um estudo detalhado sobre as hidrovias brasileiras, buscando analisar a provável demanda por transportes hidroviários e indicar áreas propícias para instalações de portos (LABTRANS, 2013).

Para tanto, criou uma base de dados georreferenciada, contando com um sistema de informações de transporte aquaviário e de instalações portuárias, o Sigtaq, conectado a outras bases de dados da Antaq. A partir daí, identificaram-se as principais vias economicamente navegadas e os portos identificados do Brasil.

O estudo foi desenvolvido nas seguintes etapas: determinação da área de influência; identificação de produtos relevantes; identificação dos fluxos relevantes; projeção da demanda para horizontes futuros; diagnóstico da rede atual de transportes; definição da rede futura e novas áreas propícias para instalação de terminais hidroviários; estimativa de investimentos, custos operacionais e fretes; simulação dos projetos; avaliação econômica de novos terminais. O horizonte de tempo para a realização do estudo foi 2030.

f) Plano Nacional de Logística Portuária (PNLP)

O PNLN é o mais completo estudo sobre o setor portuário do Brasil, realizado pela Secretaria de Portos (SEP), cuja missão é elaborar o planejamento setorial em conformidade com as políticas e diretrizes de logística integrada, abrangendo tanto acessos portuários quanto infraestrutura e desenvolvimento urbano. O PNLN é uma ferramenta de apoio para a tomada de decisões e tem o objetivo de oferecer soluções para problemas provocados pela falta de uma estrutura uniforme na divisão clara de tarefas e responsabilidades entre entidades públicas e privadas. A SEP, por meio do PNLN, elabora diagnósticos e prognósticos do setor, avalia cenários e propõe ações de médio a longo prazo para a tomada de decisões (BRASIL/SEP/PR, 2015).

g) Política Nacional de Aviação Civil (Pnac)

A Pnac prevê o desenvolvimento, por parte de instituições responsáveis, da aviação civil brasileira. Nessa política, o Estado é responsável por coordenar a atuação de órgãos e entidades públicas e privadas envolvidas, além de traçar objetivos e metas. O desenvolvimento da aviação civil citado compreende uma série de objetivos, listados a seguir:

- Segurança durante as operações: objetivo permanente e pré-requisito da atividade de aviação;
- Prestação de serviço adequado: prevê um sistema de aviação regular, contínuo e pontual;
- Proteção ao meio ambiente: minimiza efeitos negativos ligados à atividade que incluem ruídos, emissões de poluentes e impactos ambientais;
- Garantia do direito do consumidor: impõe a necessidade de uma normatização que contemple o Código de Defesa do Consumidor, garantindo seus direitos sem ter que recorrer à via judicial;
- Desenvolvimento da aviação civil: a complexidade existente na operação do setor exige medidas que promovam melhoria na infraestrutura aeronáutica, formação e capacitação de profissionais, abertura de empresas de fabricação e manutenção de componentes aeronáuticos, competitividade, criação de marco regulatório atualizado, dentre outras;
- Eficiência nas operações: inclui o aperfeiçoamento dos trajetos, otimização do espaço aéreo e da infraestrutura aeroportuária, organização e métodos, melhoria de processos e práticas.

A implantação da Pnac deve ser acompanhada pelo Ministério da Defesa, por intermédio da Secretaria de Aviação Civil, auxiliado pelos demais órgãos que integram o Conselho de Aviação Civil (Conac). O acompanhamento deve ser feito por gestão de indicadores que meçam a eficiência de implementação das medidas elaboradas para atingir os objetivos traçados. O plano permite atualizações nos seus objetivos e ações estratégicas de acordo com o contexto nacional, regional e internacional do sistema de aviação.

h) Programa de Aviação Regional

Considerando o modal aéreo como fator estratégico para a conexão de regiões de difícil acesso por rodovias – que é a principal via de transporte no Brasil – e dando sequência ao Pnac, foi criado o Programa de Aviação Regional com o intuito de solucionar o gargalo na integração e no desenvolvimento nacional e democratizar o transporte aéreo do país.

Há poucos aeroportos operando no interior de regiões, e os que estão ativos têm infraestrutura precária. Além disso, há uma série de estudos que mostram que os preços das passagens regionais são, em média, 31% mais caros que os dos voos entre capitais, o que inviabiliza o trajeto de cerca de 43% da população regional. O programa tem por objetivo implementar uma rede de aeroportos regionais que atuem a preços competitivos, de modo que 96% da população brasileira estejam, no máximo, a 100 km de um aeroporto com condições suficientes para operar regularmente.

São cerca de 270 aeroportos em localidades distintas que o programa planeja construir ou reformar e, para dar suporte a essa expansão, pretende-se aumentar a capacidade dos municípios e estados de geri-los e subsidiar as passagens em tarifas em voos regionais e tornar esse meio de transporte competitivo perante os ônibus regionais.

O programa conta com o Fundo Nacional de Aviação Civil (Fnac), alimentado pelo governo por meio de licenças nas concessões de aeroportos e parte das tarifas aeroportuárias. A estimativa inicial é de R\$ 7,3 bilhões aplicados em investimentos no programa. O Programa de Aviação Regional é dividido em três eixos:

- 1) Infraestrutura – é necessário oferecer a infraestrutura adequada aos aeroportos, por meio de reformas e ampliação, além de construir novas redes em locais desprovidos de aeroportos. A seleção dos 270 municípios para a execução de obras aeroportuárias dentre os 5.565 existentes no Brasil atendeu critérios socioeconômicos, turísticos, de integração nacional e espacial. Os empreendimentos foram divididos em seis lotes: quatro regiões geográficas, aeroportos da Infraero e novos aeroportos. Foi preciso realizar um diagnóstico em todos os aeroportos regionais antes da execução das obras e foram levados em conta aspectos como movimentação atual, demanda estimada para os próximos 20 anos e crescimento da economia local. A construção dos terminais obedece a um dos quatro padrões de arquitetura determinados de modo a permitir a expansão de acordo com a necessidade futura e garantindo velocidade a realização do programa;
- 2) Gestão – a capacidade técnica e financeira de alguns municípios gera dificuldades de gestão administrativa. Desse modo, o governo estabeleceu diretrizes para a outorga de aeroportos regionais, dando preferência a delegar aeroportos para os estados, desde que demonstrem a capacidade técnica e financeira exigida para a gestão de aeroportos regionais. Também há preocupação com a formação do pessoal em diferentes categorias de capacitação por meio do convênio com a Infraero e o Comando da Aeronáutica e o programa Treinar, da Secretaria de Aviação;
- 3) Incentivos – prevê estímulos e subsídios à aviação regional, adotando medidas análogas a casos internacionais em que populações encontram-se isoladas em longas distâncias, de modo a integrar comunidades à rede nacional de aviação civil. São dois subsídios compreendidos pelo programa: um para tarifas aeroportuárias e aeronáuticas, arcadas pela União, e um subsídio das passagens aéreas regionais, desde que haja movimentação mínima de 600 mil passageiros ao ano (800 mil, se for na Amazônia).

Síntese das barreiras e dos cobenefícios associados à adoção de políticas visando à mudança modal no setor de transportes

O Quadro 23 apresenta, com base nas discussões desta seção, barreiras e cobenefícios para as políticas de mudança modal no setor de transportes.

Quadro 23 – Barreiras e Cobenefícios Relacionados à Adoção de Medidas de Mudança Modal

Perfil	Barreiras			Cobenefícios		
	Políticas/ Econômicas	Técnicas/ Infraestrutura	Ambientais/Culturais	Econômicos	Sociais	Ambientais
Mobilidade urbana	Falta de disponibilidade de transporte público adequado	Falta de infraestrutura segura para uso de bicicleta: ciclovias, má sinalização, má iluminação	Dependência de automóveis	Melhoria na segurança energética	Melhoria na qualidade de vida	Benefícios ao ecossistema e biodiversidade dada a redução da poluição do ar
	Falta de densidade populacional para permitir mais acesso a serviços	Falta de infraestrutura segura para caminhar: buracos, calçadas pequenas, má sinalização, má iluminação	Falta de crença dos governantes quanto ao valor da educação para mudança comportamental da população	Redução da dependência de petróleo	Programas culturais: compartilhamento de bicicletas, centros históricos para pessoas	Menor uso do solo
	Redução de produtividade: maior tempo de deslocamento	Falta de capacitação de técnicos e gestores quanto ao conceito de mobilidade urbana sustentável	Status: ter seu próprio automóvel	Produtividade: redução de congestionamentos, redução de tempo de viagem	Segurança nas ruas: redução de acidentes de trânsito	–
	Oposição quanto ao aumento de custos e restrições de estacionamentos	–	–	–	Acessibilidade	–
Transporte de Carga	Competitividade do modal férreo	Lock-in infraestrutura rodoviária	Restrições físicas	Melhoria na segurança energética: diversificação	Segurança nas estradas: redução de acidentes	Benefícios ao ecossistema e biodiversidade dada a redução da poluição do ar
	Oposição pelo aumento de custos	Falta de integração entre modais: baixa disponibilidade de terminais multimodais	–	Redução da dependência de petróleo	–	Menor uso do solo pela infraestrutura de transporte
	Elevado custo do frete aéreo	Frete rodoviário brasileiro desestimula o transporte por outros modais	–	Produtividade: redução de tempo de viagem	–	–
	Redução de produtividade: maior tempo de deslocamento	Gargalos físicos e operacionais no transporte ferroviário: locomotivas com idade média avançada	–	Geração de emprego	–	–
	Falta de administração integrada entre o setor de transportes, uso do solo e meio ambiente	Necessidade de expansão integrada da malha ferroviária	–	–	–	–

Fonte: Elaboração própria

8.1.3 COBENEFÍCIOS, BARREIRAS E AS EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS E NACIONAL ASSOCIADAS A POLÍTICAS DE BIOCOMBUSTÍVEIS

O uso de combustíveis alternativos tem sido uma constante por todo o mundo. Seja como incentivo à redução de emissões, seja pelas economias de divisa geradas, muitos programas de uso de biocombustíveis têm sido utilizados. De fato, os biocombustíveis criam uma forma de alteração da matriz energética, inserindo combustíveis com baixa emissão de carbono, normalmente com baixa mudança nos veículos existentes no mercado e na infraestrutura de distribuição (IEA, 2011b). Seus cobenefícios, portanto, contribuem para melhorias na segurança energética, por diversificar o consumo de combustíveis no setor, reduzindo a exposição à volatilidade do preço do petróleo. Além disso, ressalta-se a geração de empregos e de renda tanto na indústria quanto no meio rural. É possível alcançar benefícios ao ecossistema e biodiversidade dada a redução da poluição do ar.

Contudo, o estímulo ao uso de biocombustíveis enfrenta barreiras políticas, econômicas, técnicas e culturais. A principal barreira é a existência persistente de subsídios para combustíveis fósseis, o que reduz a competitividade da indústria de biocombustíveis. Alguns biocombustíveis, principalmente de segunda geração, apresentam custos elevados e, dependendo da matéria-prima utilizada na produção, podem causar elevações nos preços de determinados alimentos. Quanto a barreiras técnicas, ressalta-se que, em geral, os biocombustíveis apresentam desempenho reduzido se comparados com os fósseis, bem como não são compatíveis com todos os tipos de veículos existentes no mercado. Nesse sentido, destaca-se a barreira comportamental da população em ter o hábito de utilizar combustíveis fósseis, apresentando restrições para mudar seu consumo, inclusive para novos veículos compatíveis.

8.1.3.1 ETANOL

No Brasil, a decisão de utilizar a cana-de-açúcar para produzir etanol de maneira complementar à produção de açúcar foi tanto política quanto econômica. O Programa Brasileiro de Álcool (Proálcool) foi oficialmente estabelecido em 1975 em resposta ao primeiro e ao segundo choque do petróleo e à baixa dos preços do açúcar no mercado internacional, o que colocava a indústria da cana, uma das principais atividades econômicas do país, em risco (MOREIRA; GOLDEMBERG, 1999). O principal objetivo declarado do governo era economizar usando o etanol como suplemento ao abastecimento de gasolina no país (HIRA; DE OLIVEIRA, 2009), aumentando a oferta líquida de divisas por meio da redução da demanda por combustíveis importados. Ademais, buscava-se reduzir as disparidades de renda entre as regiões, aumentar a renda nacional mediante a implantação de recursos subutilizados e ampliar o crescimento do capital nacional com os produtos do setor.

O modelo de ação do governo, isto é, o plano para organizar instituições, recursos, enquadramento legal e mecanismos de apoio, teve como grupos-alvo a indústria da cana, as montadoras, as empresas públicas (como a Petrobras), instituições governamentais (como o CNPq e o BNDES), universidades e proprietários de automóveis. A Comissão Nacional do Álcool (CNAL) foi criada para desenvolver e coordenar o programa, de modo que todas as decisões e intervenções fossem centralizadas e implementadas rapidamente, características do governo militar da época (MAROUN; SCHAEFFER, 2012).

Na primeira fase do Proálcool, que se estendeu de 1975 a 1979, criaram-se condições para que, no curto prazo, se expandisse a produção de etanol, isto é, desviou-se parte da produção de açúcar para a produção de etanol por meio de destilarias anexas. Deu-se continuidade à adição de etanol à gasolina,⁷² substituindo os 20% por 25% em volume. Inicialmente, o preço do açúcar no mercado internacional apresentou elevação, em grande medida devido à redução de oferta, porém, em 1979, voltou a cair, tornando necessária nova ação do governo. Na segunda fase do programa (1979-1985), continuou-se com a produção de etanol anidro para adição à gasolina, mas também se iniciou a produção de etanol hidratado. Nessa fase, a produção de etanol triplicou, foram produzidos carros movidos somente a álcool (hidratado), houve expansão da cana para áreas pouco tradicionais para aumentar a produção, 4% das áreas cultivadas no Brasil eram dedicados à produção de etanol e este passou a ser produzido em destilarias autônomas de baixo custo.⁷³ A intenção era expandir ainda mais o programa, mas com a forte queda dos preços internacionais de petróleo, o chamado contrachoque, foi preciso aguardar.

Após essas fases, o novo aumento na produção de etanol se deu a partir de 2003 por meio da inovação tecnológica em sistemas avançados para o controle da mistura de combustível e ignição, o que tornou possível o lançamento dos veículos com motores flexíveis, os chamados *flex fuel*, no Brasil. Nesses motores, é possível utilizar gasolina (com 20% ou 25% de etanol anidro), o etanol hidratado puro ou mesmo a mistura dos dois, em qualquer proporção, em conformidade com a eficiência e os requisitos de dirigibilidade que devem ser cumpridos de acordo com os limites legais para a emissão de gases de escape (JR, 2007). Os automóveis *flex fuel* dão maior autonomia ao consumidor na escolha de qual combustível utilizar, de acordo com as prioridades dos condutores: menor preço, menos emissão de GEE, maior eficiência, etc.

Nas primeiras fases do programa, a utilização do etanol tornou-se viável para os consumidores devido à política de preços aplicada aos combustíveis no Brasil, isto é, os preços praticados pelos produtores eram determinados pelo governo federal, assim como os preços dos combustíveis em geral. Com a eficiência e a competitividade de custos da produção de etanol evoluindo ao longo do tempo, esse apoio tornou-se desnecessário (GOLDEMBERG et al., 2004). Assim, em 2002, entraram em vigor medidas de desregulamentação do setor de combustíveis que visavam eliminar o controle de preços de faturamento, bem como de subsídios, de modo que os combustíveis passaram a ter seus preços determinados “livremente” nas etapas intermediárias entre as distribuidoras e o consumidor final.

Dessa forma, a realização mais importante do Proálcool foi a criação de um mercado de etanol, com a inclusão obrigatória de uma porcentagem na gasolina comercializada no país, em grande medida alcançada por meio de elevados subsídios na produção de etanol e na cadeia de consumo. Na verdade, garantiam-se preços baixos para o etanol por meio de cobranças de taxas sobre os derivados de petróleo, sobretudo a gasolina, o que servia como pagamento por parte dos custos do programa (subsídio cruzado). Ademais, promoveu-se o desenvolvimento tecnológico no setor dados os grandes recursos públicos destinados a investimentos em P&D, juntamente com incentivos para o setor privado na busca de inovações e investimentos em atividades relacionadas ao etanol, como linhas de crédito especiais para expansão da capacidade de usinas, bem como manutenção de estoques estratégicos para estabilizar o fornecimento, visando assegurar preços mínimos para os produtores (MAROUN; SCHAEFFER, 2012).

⁷² Continuação porque essa prática já existe no Brasil desde a década de 1930, sempre em pequenas quantidades.

⁷³ O Banco Mundial ajudou o Proálcool, mas com a condição de que a concorrência para a construção de destilarias autônomas fosse internacional.

8.1.3.2 BIODIESEL

Em dezembro de 2004, foi lançado pelo governo brasileiro o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), com o objetivo de introduzir o biodiesel na matriz energética brasileira, com enfoque no desenvolvimento regional e inclusão social. Dessa forma, o PNPB desenvolveu um modelo tributário e mecanismos para a inclusão da agricultura familiar, institucionalizando a base normativa para produção e comercialização do biodiesel no Brasil (BRASIL/MME, 2015).

São quatro as diretrizes do PNPB: aproveitamento das oleaginosas de acordo com as diversidades regionais, segurança de abastecimento para o novo combustível, garantia de qualidade para o consumidor e busca da competitividade em face do diesel de petróleo. Sua gestão é realizada pela Comissão Executiva Interministerial do Biodiesel (CEIB), coordenada pela Casa Civil da Presidência da República e pelo Grupo Gestor, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MME). A implementação, o monitoramento do programa e ações de melhoria são realizados pela Comissão Executiva Interministerial (CEIB) (BRASIL/MME, 2015).

Graças ao lançamento do programa, a iniciativa privada vem participando por meio de investimentos na distribuição do combustível, testes em laboratórios, pesquisa e produção de matérias-primas, dada a segurança de um ambiente regulatório proporcionado pela definição de metas e pela criação de um marco legal para o biodiesel (BRASIL/MME, 2015).

Regularmente, o biodiesel é vendido misturado ao diesel de petróleo nos postos de abastecimento espalhados pelo Brasil. Sua comercialização ocorre pela realização de leilões públicos promovidos pela ANP (BRASIL/MME, 2015). A adição do biodiesel ao diesel vem crescendo nos últimos anos e aumentará para B8 em março de 2017.

8.1.3.3 BIOJET

No Brasil, diversas parcerias vêm sendo feitas para o desenvolvimento de biocombustíveis para a aviação, a partir de pinhão-manso, camelina, sebo, alga, soja, canola, palma, coco e plantas halófitas (resistentes ao sódio), como matérias-primas para produção do bioquerosene e consequente redução dos impactos ambientais (VELÁZQUEZ; KUBOTANI; VELÁZQUEZ, 2012). Internacionalmente, os tipos de biocombustíveis para a aviação que estão sendo desenvolvidos englobam os *drop-in*, querosene para-fínico sintético obtido por Fischer-Tropsh e o querosene para-fínico obtido pelo hidroprocessamento.

Os *drop-in*, quimicamente indistinguíveis do combustível tradicional, podem ser misturados a ele de modo a promover desempenho e segurança similares sem que sejam necessárias alterações nos sistemas da aeronave e dos motores ou na infraestrutura de armazenamento e distribuição (VELÁZQUEZ; KUBOTANI; VELÁZQUEZ, 2012).

O querosene para-fínico sintético obtido por Fischer-Tropsh, conhecido como FT-SPK, provém da gaseificação do carvão, gás natural ou biomassa, em que o monóxido de carbono e hidrogênio obtidos são combinados e sofrem um processo de síntese por Fischer-Tropsh. Em seguida, esses produtos são polimerizados ou tratados pela reação entre catalisador e hidrogênio, processo conhecido como hidroprocessamento. A etapa final é a de fracionamento para que o produto obtenha as propriedades adequadas para ser utilizado em motores a reação (ICAO, 2010).

Atualmente, está aprovado por uma norma para o uso desse querosene em proporção que permita a mistura com o JET-A1 devido a diferenças de densidade, capacidade de lubrificação e compatibilidade com alguns materiais poliméricos (SWAFEA, 2011).

Por fim, o querosene parafínico obtido pelo hidroprocessamento, conhecido como *hydroprocessed renewable jet* (HRJ), é composto por hidrocarbonetos parafínicos produzidos pela refinação de triglicérides e ácidos graxos presentes naturalmente em óleos vegetais e gorduras residuais de origem animal (VELÁZQUEZ; KUBOTANI; VELÁZQUEZ, 2012). Também é referido como querosene parafínico bioderivável ou bio-SPK (SWAFEA, 2011).

8.1.3.4 SÍNTESE DAS BARREIRAS E DOS COBENEFÍCIOS ASSOCIADOS À ADOÇÃO DE POLÍTICAS DE BIOCOMBUSTÍVEIS NO SETOR DE TRANSPORTES

O Quadro 24 resume, à luz das discussões desta seção, as barreiras e os cobenefícios para as políticas de biocombustíveis discutidas no setor de transportes.

Quadro 24 – Barreiras e Cobenefícios Relacionados à Adoção de Medidas de Biocombustíveis

Perfil	Barreiras			Cobenefícios		
	Políticas/ Econômicas	Técnicas/ Infraestrutura	Ambientais/ Culturais	Econômicos	Sociais	Ambientais
Biocombustíveis	Alguns biocombustíveis apresentam custos elevados	Desempenho reduzido em relação ao diesel e à gasolina	Hábito de usar combustíveis fósseis	Melhoria na segurança energética derivada da diversificação	Menor exposição a volatilidade dos preços do petróleo	Benefícios ao ecossistema e biodiversidade
	Existência de subsídios para combustíveis fósseis	Nem sempre é compatível com todos os tipos de veículos		Redução da dependência de petróleo	Criação de postos de trabalho	Redução na emissão de poluentes locais
	Impactos nos preços dos alimentos	Limites à mistura em motores de ciclo diesel		Geração de emprego no setor agrícola	Mobilização de cooperativas agrícolas	Aumento do sequestro de carbono na agricultura

Fonte: Elaboração própria

8.2 SUBSÍDIOS PARA A FORMULAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE POLÍTICAS PÚBLICAS VISANDO À ADOÇÃO DAS ATIVIDADES DE BAIXO CARBONO NO SETOR DE TRANSPORTES

As mudanças climáticas impõem desafios no sentido de encontrar novos meios de produzir e mobilizar recursos, pessoas e serviços. Nesse intenso processo de transformação, cria-se oportunidade para que se consiga promover integração de políticas públicas setoriais, tradicionalmente pouco articuladas, para apoiar o fomento da inovação tecnológica e promover o desenvolvimento sustentável. Essa transição será um desafio maior para países em desenvolvimento e subdesenvolvidos, os quais não dispõem de recursos para investir em todos os projetos necessários para adaptação a essa nova realidade.

A utilização de novas tecnologias e a gestão do tráfego serão decisivas para a redução das emissões do setor de transportes. A corrida à mobilidade sustentável é global, de modo que adiar essas iniciativas poderá condenar o setor a um declínio irreversível. A infraestrutura molda a mobilidade, porém nenhuma transformação ocorrerá sem o sustentáculo de uma rede articulada de *stakeholders*. Em geral, o investimento em infraestrutura de transporte contribui para o crescimento econômico, criando riqueza e emprego, incrementando as trocas comerciais, a acessibilidade geográfica e a mobilidade. Todavia deve ser planejado de forma a maximizar as externalidades positivas e possíveis cobenefícios, bem como minimizar as externalidades negativas, principalmente sobre o meio ambiente.

A análise de políticas requer o diagnóstico preciso dos problemas e a identificação dos objetivos a serem perseguidos. É necessário, portanto, esclarecer quais são os obstáculos que devem ser enfrentados. No Brasil, são enfrentados desafios que incluem restrições orçamentárias, resistência política, barreiras administrativas e legais, bem como oposição da opinião pública. Outras barreiras gerais que se apresentam são restrições físicas, capacidade institucional e questões jurisdicionais. Nesse sentido, políticas públicas no setor de transportes desempenham papel fundamental na formação e no rumo do mercado e, portanto, devem ser bem planejadas, tendo em vista que podem distorcer decisões em favor de modais menos eficientes, por exemplo, via subsídios a combustíveis fósseis ou, até mesmo, pela falta de informação sobre demais alternativas de transporte, cadeias de fornecimento, condições de financiamento, entre outras.

As restrições financeiras manifestam-se pelos altos custos iniciais necessários para infraestrutura, ferramentas de gestão da demanda e programas de eficiência energética. Historicamente, o financiamento tem sido destinado, predominantemente, para construção e manutenção de estradas (IEA, 2013c), por meio de impostos gerais ou receitas específicas, como impostos sobre combustíveis. Desse modo, os projetos têm sido tradicionalmente financiados com verbas públicas, mas não se pode deixar de destacar o crescente papel de bancos multilaterais e instituições financeiras na diluição dos riscos do setor e como suporte ao Estado no papel de provedor da infraestrutura. Atualmente, países e bancos têm percebido a necessidade crescente de soluções mais eficientes, tendo direcionado financiamentos, sobretudo, para o desenvolvimento de modais ferroviários e hidroviários, bem como para o transporte público e modais não motorizados de transporte (por exemplo, ciclovias).

Tendo em vista que determinados instrumentos de políticas (transversais) podem ser aplicados para diferentes modais, tanto de passageiro quanto de carga, esta seção foi dividida por tipo de política (eficiência energética, mudança modal e biocombustíveis) e subdividida de acordo com suas diferentes aplicações.

8.2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

8.2.1.1 MODAIS CONVENCIONAIS: CARROS, ÔNIBUS, CAMINHÕES, TRENS, EMBARCAÇÕES E AERONAVES

Para alcançar maior eficiência no transporte, diversas abordagens seriam possíveis – tratar da eficiência da frota existente de veículos é uma possibilidade, por exemplo. Todavia, seria antiprático e custoso aumentar a eficiência dos veículos em circulação ao mesmo tempo em que a frota de veículos se renova em um intervalo de tempo em torno de dez a 15 anos, o que favorece uma política voltada a

novos entrantes (IEA, 2012c). Os três principais componentes que deveriam ser considerados em uma política integrada de eficiência energética veicular são medidas informacionais, padrões de eficiência e medidas fiscais. Dessa forma, medidas fiscais e informacionais tendem a ter maior potencial de atuação e resultados mais rápidos no modal rodoviário, mais precisamente nas categorias de veículos leves e pesados. Por outro lado, padrões de eficiência alcançam o setor como um todo, o que inclui os modais ferroviário, hidroviário e aéreo, tanto de carga quanto de passageiros.

Atualmente, não há informações suficientes a respeito da eficiência dos veículos no Brasil. Embora o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular esteja em funcionamento desde 2008, a adesão é facultada a fabricantes e importadores de automóveis. A proposta, portanto, seria tornar obrigatória a etiquetagem a todos os modelos de veículos leves e pesados novos, de modo que o fornecedor deve informar os valores de consumo energético de todos os seus modelos de automóveis previstos para comercialização no período. Cabe ressaltar que o ciclo de teste deve estar em consonância com a realidade nacional, de modo que os procedimentos padronizados para os ensaios devam continuar sendo realizados por ciclos de condução que simulam o uso dos veículos em trânsito urbano e de estrada. Dessa forma, acredita-se que os consumidores terão condições de compreender plenamente os benefícios de automóveis, ônibus e caminhões eficientes, bem como modificar seu padrão de consumo na busca de minimizar o custo do ciclo de vida do veículo ao realizar a compra. No futuro, existe a possibilidade de se considerar também a etiquetagem para vendas de veículos usados, dada a alta participação nas vendas totais de automóveis. Essa medida já é implementada na Nova Zelândia e no Reino Unido e vem contribuindo também para conscientizar os consumidores quanto à importância de pensar acerca da eficiência.

Nesse caso, a implementação e o monitoramento poderiam ser atribuídos a agências e instituições federais e de regulação, como o Inmetro e a ANTT. Compreende-se que a etiquetagem veicular poderia ser aplicada no curto prazo, ou seja, em um horizonte de implementação entre um e dois anos.

Quanto às medidas fiscais, busca-se a implementação do *feebate*, isto é, taxaço de veículos ineficientes combinada com abatimento de impostos sobre veículos eficientes. Sendo assim, a proposta, de foco mais específico, visa aumentar o IPI para utilitários esportivos (SUV e *pick-ups*), tendo em vista o crescimento desse mercado nos últimos anos. As vendas de picapes pequenas cresceram cerca de 5%, utilitários esportivos 9% e furgões pequenos 19%, mesmo com a desaceleração na indústria automobilística. Essa medida tem o intuito de frear o recente alto crescimento das vendas dessas categorias que, pelo tamanho, consomem mais combustíveis. Atualmente, as taxaço são progressivas de acordo com a cilindrada, o que deve ser mantido: veículos 1.0 (7% de IPI); veículos maiores que 1.0 e menores que 2.0 (13%); e veículos maiores que 2.0 (25%) (BRASIL/MF, 2012). Além da taxaço dessa categoria, deve-se considerar a isenço de impostos para veículos híbridos, de modo a contribuir para uma melhor transição para um transporte individual eletrificado.

Compreende-se que os agentes relacionados à gestão econômico-financeira estatal, tal qual o Ministério da Fazenda, seriam responsáveis pela implementação de medidas fiscais. Entretanto, deve-se destacar que deverão ser avaliados, previamente, impactos econômicos da implementação dos *feebates*, o que deveria iniciar no curto prazo (a partir de 2017), com horizonte de implementação do instrumento no médio prazo (a partir de 2020).

Na construção de medidas de padrão de eficiência, muitas vezes, são definidas metas rigorosas, o que dificulta sua implementação. Nesse sentido, uma das propostas é a criação de metas de eficiência de longo prazo para todos os modais, de modo que metas mais rigorosas devem ser definidas para prazos mais longos, ao passo que metas menos audaciosas podem ser obtidas em intervalos de tempo mais curtos. Existem alternativas que podem tornar seu atendimento mais suave, como a criação de um mercado de créditos que conte com os seguintes mecanismos:

- Estocagem de créditos: caso um fabricante exceda a meta em um ano, ele poderia utilizar esse crédito em outro ano;
- Venda de créditos: os créditos poderiam ser não só utilizados entre anos, mas também comercializados entre empresas;
- “Supercréditos”: espécie de recompensa para modais extremamente eficientes – na regulação europeia, por exemplo, montadoras de automóveis recebem créditos extras caso produzam veículos que emitam menos de 50 gCO₂/km (IEA, 2012c).

Segundo a IEA (2012c), uma política bem elaborada deveria obter equilíbrio entre mudança e previsibilidade, o que seria alcançado por meio de metas de longo prazo bem definidas, de modo que os fabricantes possam se adaptar gradualmente às metas.

Outro ponto relevante diz respeito à verificação do cumprimento da meta. Para que as empresas obedeçam ao padrão, é necessário estabelecer penalidades ao não cumprimento das metas. Em última análise, o valor da penalidade fornece um valor máximo ao qual os fabricantes estarão dispostos a investir em tecnologias eficientes. Se a multa for pequena, os fabricantes optarão por pagá-la (IEA, 2012c).

No caso do transporte de cargas, em particular no modal rodoviário, dever-se-ia seguir como base a estrutura do atual programa americano de efficientização veicular, associado com uma política de comando e controle para sucateamento de veículos de carga. Nesse caso, caminhões com mais de 20 anos de uso deveriam ser sucateados, com disponibilidade de novas linhas de crédito para aquisição de veículos novos. Mais do que isso, a sucata poderia ser direcionada para a indústria de ferro-gusa, o que reduziria emissões daquele setor. A implementação e o monitoramento dos instrumentos seriam atribuídos, respectivamente, aos ministérios e departamentos estaduais de trânsito, respectivamente. Compreende-se que o estabelecimento de uma política de sucateamento obrigatório poderia ser formulado rapidamente, com horizonte de adoção no médio prazo (a partir de 2020).

Por fim, também é importante frisar os benefícios de se criar uma complementaridade entre o estabelecimento de padrões de eficiência e *feebates*. Ambas as políticas apresentam efeitos similares – o primeiro fixa a meta a ser alcançada enquanto o segundo corrige custos, porém ambos têm como objetivo primordial inserir novas tecnologias no mercado (ICCT, 2010). Apesar dos efeitos semelhantes, ambos podem coexistir de modo a formar uma política robusta de eficiência veicular. *Feebates* fornecem um sinal de preço mais claro para o desenvolvimento avançado de tecnologias devido à incerteza a respeito do comportamento dos padrões em dez ou 20 anos (ICCT, 2010). Em segundo lugar, a imprevisibilidade dos preços de energia e o uso de altas taxas de desconto por consumidores criam um *gap* na percepção dos ganhos de eficiência energética

para o consumidor (que tende a subvalorizá-los) e para a sociedade (ICCT, 2010). Os benefícios para a sociedade justificam a existência de padrões e um *feebate* auxiliaria os consumidores a monetizar futuras receitas incertas provenientes da economia de energia e convertê-las sob a forma de um menor custo de aquisição (ICCT, 2010). Finalmente, *feebates* fornecem incentivo para que os fabricantes excedam o padrão. Isso é especialmente relevante porque os fabricantes terão diferentes capacidades de atender às metas (fabricantes no segmento de veículos de luxo, por exemplo, podem ter maiores dificuldades) e, apenas com um padrão, as empresas tendem a fazer apenas o mínimo para atendê-lo. Com um *feebate*, todos os fabricantes são estimulados a melhorar, inclusive além das metas (ICCT, 2010).

8.2.1.2 NOVAS TECNOLOGIAS

Quanto aos veículos elétricos, o suporte a programas de P&D continua sendo essencial a fim de garantir automóveis com maior autonomia, dirigibilidade e baterias menos onerosas. Ademais, o processo de eletrificação veicular precisa ser considerado a partir de uma perspectiva mais ampla, incluindo uma abordagem multimodal, de modo a integrar ônibus, motocicletas e trens elétricos com os automóveis. Assim, os governos devem auxiliar cidades e regiões no desenvolvimento de modelos de negócios sustentáveis que contribuam para melhorias na infraestrutura necessária para a adequada circulação de veículos elétricos (IEA, 2015).

Para promover melhorias na aceitação do hidrogênio como fonte energética, é imprescindível o apoio a programas de P&D com aplicações estacionárias e para transporte, bem como para armazenamento, produção e comercialização. Para acelerar sua implantação, códigos e padrões precisam ser desenvolvidos e harmonizados; políticas de incentivo visando à economia de combustíveis e a isenção de impostos precisam ser fortalecidas; a construção da infraestrutura de abastecimento e de recarga precisa ser posta em prática. Para isso, é necessário maior apoio a pesquisas que identifiquem os benefícios e os desafios da integração do hidrogênio ao sistema energético (IEA, 2015).

Muitos países estão implementando mecanismos de apoio em nível nacional para incentivar o uso de veículos de baixa emissão ou emissão zero. No curto prazo, são necessários investimentos da indústria automobilística e oferta atraente para os usuários, na maioria das vezes, com isenção de impostos. No entanto, mesmo com incentivos nacionais, a adoção do transporte por meio de veículos elétricos ou a célula a combustível pode não ser atraente. Nesse sentido, as autoridades locais podem desempenhar papel de apoio, principalmente na fase inicial de implantação das políticas. Para superar tais desafios, existem medidas disponíveis às autoridades locais que podem ser utilizadas para complementar os incentivos em nível nacional. São elas:

- Zonas de baixa emissão de poluentes: ter o combate da poluição local como objetivo principal para políticas no setor de transportes pode incentivar novas tecnologias. Nesse sentido, a criação de regimes tarifários para determinadas áreas dos centros urbanos, como as zonas de baixa emissão em Londres (Figura 171), restringe a autonomia dos veículos movidos a combustíveis fósseis e, além de garantir melhorias na qualidade do ar, estimula maior utilização de veículos elétricos e a hidrogênio. Ademais, a criação de dias livres de carros e de estradas livres de carros ou em horário de pico de condução é alternativa para mitigar o congestionamento e as consequências ambientais do transporte urbano;



Figura 171 – Zona de Baixa Emissão de Poluentes em Londres

Fonte: IEA, 2014

- Táxis elétricos: embora táxis representem uma pequena porcentagem dos veículos urbanos, eles percorrem grandes distâncias diárias, o que os torna grandes contribuidores dos problemas associados a mudanças climáticas e qualidade do ar nas cidades. Nesse sentido, uma iniciativa seria a substituição dos táxis movidos a combustíveis fósseis (gasolina e gás natural) por modelos mais limpos, como os veículos elétricos e a célula a combustível. Em Bogotá (Colômbia), foi lançado, em 2013, o Projeto Biotaxis com a intenção de criar a maior frota de táxis elétricos da América;
- Incentivos locais para encorajar uma maior adoção de novas tecnologias: em Oslo (Noruega), o conjunto de incentivos locais vai desde isenções a pedágios, viagens gratuitas de balsas nas estradas, eletricidade livre até estacionamento gratuitos em todos os espaços municipais. Outra opção é possibilitar maior conveniência em estacionamentos, ao dar preferência a veículos elétricos e a hidrogênio, ou autorizar o acesso às faixas rápidas exclusivas para ônibus (ELEMENT ENERGY, 2014);
- Planejamento regional: a integração bem-sucedida dos veículos elétricos e, mais ainda, dos veículos a hidrogênio nos sistemas de transporte e energia de um país não pode ser alcançada apenas pelos planos municipais, mas, sim, pela cooperação entre todos os *stakeholders* relevantes em nível regional. Na Itália, o projeto Mi Muovo Elettrico visa desenvolver a mobilidade elétrica tanto em nível municipal quanto em nível nacional por meio de um cartão de mobilidade que integra ônibus, trens, compartilhamento de bicicletas/carros e pontos de recarga de veículos elétricos na região de Emilia-Romagna (IEA, 2014);
- Engajamento de crianças e jovens acerca das novas tecnologias: muitos governos têm como meta o aumento da participação dos veículos elétricos para 2030 e 2050, de modo que grande parte desse progresso acabará sendo conduzido pela atual geração de crianças e jovens. Nesse sentido, cidades, governos e a indústria automobilística devem educar jovens com o intuito de conscientizá-los quanto aos benefícios dos veículos elétricos e a hidrogênio, bem como estimular o interesse nas áreas de ciência, tecnologia, engenharia e matemática;

- Compartilhamento de veículos elétricos e de veículos a hidrogênio: essa é uma iniciativa que pode acelerar a eletrificação e hidrogenização da frota de automóveis, principalmente nas cidades. Novos modelos de negócios, baseados no conceito de economia compartilhada, permitem que as pessoas mantenham o mesmo estilo de vida, sem precisar adquirir mais, o que impacta positivamente a economia e a sustentabilidade do planeta. Em Paris (França), foi lançado, em 2011, o Autolib', projeto de compartilhamento de carros elétricos por meio de uma parceria público-privada que resultou numa ampla rede de *hubs* espalhados pela cidade provendo fácil acesso à mobilidade de emissão zero (Figura 172);



Figura 172 – Compartilhamento de Carro Elétrico em Paris

Fonte: IEA, 2014

- Novas tecnologias para visitação em pontos turísticos: muitos destinos turísticos dependem do clima ou de recursos naturais, como a vida selvagem e a biodiversidade, para atrair visitantes. Contudo, o turismo também contribui para o aquecimento global, principalmente pelo grande uso de automóveis. Assim, a iniciativa de restringir veículos movidos a combustíveis fósseis a determinados pontos turísticos, com o intuito de garantir a preservação de seus atrativos, pode ter como alternativa de transporte os veículos elétricos e os a célula a combustível de baixo impacto ambiental. Por exemplo, Zermatt, na Suíça, é um de vários *resorts* que se utiliza do *marketing* “destinos turísticos sem carro”;
- Compartilhamento de recargas elétricas: tecnologias e novos modelos de negócios podem expandir o acesso a tomadas elétricas, de modo a criar redes públicas de carregamento de alta densidade para suportar o aumento da circulação de veículos elétricos. A maior vantagem dos veículos elétricos é que a maioria da infraestrutura já está estabelecida sob a forma de redes de transmissão. Em Berlim (Alemanha), o projeto Ubitricity desenvolveu uma tecnologia capaz de carregar os veículos nos postes de luz nas ruas, informando ao usuário a quantidade de energia carregada (IEA, 2014).

Em suma, deve-se estimular economicamente a aquisição pelos consumidores no formato do realizado pelo governo japonês, que considera a redução de impostos de aquisição e circulação. Ademais, é necessário regulamentar a comercialização de energia elétrica por postos de combustíveis, *shoppings* e afins para viabilizar a recarga veicular. Ainda, devem-se implementar políticas de apoio ao desenvolvimento de infraestrutura de carregamento rápido e considerar medidas locais para incentivar a tecnologia, tal qual zonas restritas à circulação por veículos elétricos e táxis elétricos.

Instrumentos de políticas públicas relacionados ao incentivo econômico seriam de atribuição de ministérios, bancos públicos e privados, devendo-se inicialmente avaliar, no curto prazo, impactos das medidas de incentivo com aplicação no médio prazo (a partir de 2020). No que se refere à regulamentação da comercialização, a implementação seria de responsabilidade de ministérios e agências federais, com adoção também no médio prazo. Finalmente, a disponibilização de infraestrutura seria atribuída a ministérios, governos estaduais e empresas privadas, com horizonte de aplicação no médio prazo (a partir de 2020).

No que se refere às medidas avançadas, que envolvem veículos a célula a combustível, ônibus movidos a etanol, embarcações com *towing kite*, veículos híbrido-hidráulicos de carga e aviões movidos a energia solar, fundamentalmente, deve-se investir em P&D. Nesse caso, seria possível recorrer à captação de recursos junto ao Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), *Green Climate Fund* (GCF) e *Global Environmental Facility* (GEF), os quais seriam direcionados para projetos de pesquisa supervisionados pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações e universidades. Em termos políticos e institucionais, seria desejável a formação de um órgão de pesquisa e implementação de tecnologias-chave de baixo carbono para auxiliar na formulação de políticas públicas relacionadas a P&D e implementação das medidas avançadas. Finalmente, em termos de capacitação, deve-se incentivar a realização regular de *roadmaps* relacionados às tecnologias-chave de baixo carbono.

8.2.2 MUDANÇA MODAL

8.2.2.1 MOBILIDADE URBANA

A compreensão da experiência de planejamento da mobilidade urbana em outros países pode ajudar a melhorar as estruturas da Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU), bem como evitar erros comuns no seu planejamento. Em primeiro lugar, a estrutura do PNMU, os esquemas de financiamento e as diretrizes para implementação das políticas nacionais, estaduais e municipais devem estar integrados de modo a reforçar o processo de planejamento estratégico e inclusivo em todo o país. Os planos municipais devem ser organizados por autoridades locais e regionais de modo que todos os *stakeholders* façam parte do processo, inclusive participação popular, garantindo maior viabilidade, confiança, entendimento e aceitação de intervenções no transporte. Desse modo, as autoridades locais devem contar com capacitação suficiente, tanto no nível pessoal quanto no técnico, e acesso a opções de financiamento a fim de avaliar a eficiência e os impactos das práticas adotadas (GIZ, 2014).

Tais lições essenciais podem contribuir para o sucesso da PNMU, a qual tem como princípio a priorização de modais não motorizados sobre motorizados, bem como transporte público coletivo sobre individual motorizado. A hierarquia da PNMU coloca as pessoas ou pedestres em primeiro lugar, seguidos de ciclistas, transporte público coletivo, transporte de carga e, por último, automóveis

particulares. Nesse sentido, para que tais objetivos sejam alcançados, propõe-se a total implementação dos seus instrumentos de gestão de demanda nas cidades com mais de 300 mil habitantes, com a expectativa de migração de modal por cerca de 440 milhões de pessoas até 2050.

Essencialmente, deve-se dar maior atenção a mecanismos de restrição e controle ao acesso de veículos motorizados nos principais centros urbanos e comerciais, a partir de uma política concreta sobre a questão dos estacionamentos, tanto de uso público quanto privado (com e sem pagamento), e da implantação de pedágios urbanos, de modo que a receita seja aplicada de forma exclusiva em infraestrutura urbana de transporte público coletivo e em financiamento do subsídio público das tarifas, principalmente de ônibus (Figura 173). Estipulação de padrões, monitoramento e controle de poluentes também podem contribuir para a redução do tráfego de veículos em pontos específicos das cidades (GIZ, 2009).



Figura 173 – Car Free: Zona de Pedestres em Berlim com Acesso Restrito a Veículos

Fonte: GIZ, 2009

Ademais, a política deve focar na expansão de faixas exclusivas de ônibus e implantação de BRT e VLT de forma a integrar regiões metropolitanas, nas quais se encontram, muitas vezes, grande parte da população que trabalha nos centros urbanos e necessita de transporte público eficiente. Bogotá é um estudo de caso muito útil para o Brasil já que apresenta as transformações feitas em uma cidade relativamente grande que contava com um sistema de transportes complexo e enfrentou elevadas barreiras para transformações (GIZ, 2011). A fim de melhorar a eficiência do transporte de massa, ressalta-se a necessidade da conclusão da expansão de linhas de metrô em cidades como Rio de Janeiro, Belo Horizonte e São Paulo, bem como da implantação do transporte metroviário nas demais cidades com população superior a 1 milhão de habitantes. Ainda sobre questões urbanas transfronteiriças, cabe ressaltar a importância de aumentar o controle da circulação e operação do transporte de carga nas grandes cidades.

Em termos de incentivos à mudança comportamental da população, deve-se seguir expandindo ciclovias e ciclofaixas e, em paralelo, construir terminais de integração entre os diferentes tipos de transporte público coletivo, como ônibus, metrô e barcas, de modo a garantir a intermodalidade, inclusive com transporte não motorizado individual, como a bicicleta. As autoridades locais devem ser obrigadas a informar de maneira gratuita e acessível os pontos de embarque e desembarque, bem como itinerários, horários, tarifas e modos de interação com os demais modais, pois se trata de um direito do usuário, o que pode ser alcançado de maneira fácil e acessível por meio da criação de uma plataforma virtual (aplicativo para *smartphones*), conforme a Figura 174.

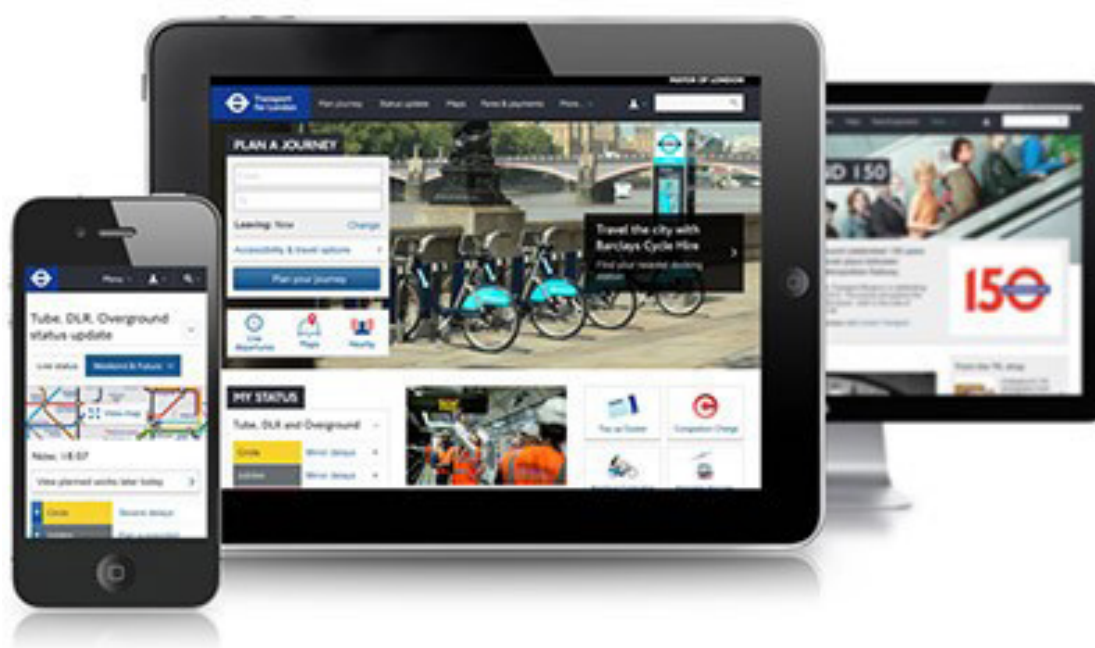


Figura 174 – Portal de Transporte Público da Cidade de Londres

Fonte: ELONDRES, 2015

Por fim, vislumbra-se como alternativa à redução do tráfego a elaboração de uma política de engajamento social que vise coordenar ações entre os principais produtores de tráfego locais, isto é, empresas, escolas, hospitais, escritórios governamentais e universidades, no intuito de elaborar planos de viagem, abrir a possibilidade de realizar trabalho de casa e sugerir os modais adequados para os diferentes destinos. Ademais, deve-se aperfeiçoar a fiscalização referente à atual qualidade do transporte público, de modo a exigir critérios mais transparentes e objetivos de produtividade e eficiência que justifiquem as tarifas cobradas. Nesse sentido, a política tarifária deve ocorrer por meio de licitações, e os municípios devem divulgar os impactos dos benefícios tarifários concedidos no valor das tarifas, de modo a garantir que um superávit tarifário seja revertido para o próprio sistema de mobilidade urbana.

A realização de investimentos em infraestrutura que promovam a mudança modal em prol da efficientização da mobilidade urbana deve ser implementada por inúmeros atores, entre os quais ministérios, governos estaduais, bancos públicos e empresas privadas. Por sua vez, o monitoramento da efetividade e as penalidades relacionadas ao descumprimento dos padrões estabelecidos devem ser atribuídos a instituições e agências federais responsáveis pela gestão do setor e, em particular, pelo planejamento da mobilidade em grandes centros urbanos. Compreende-se que a adoção dos instrumentos de políticas públicas propostos requer um prazo de cinco anos, portanto, tornar-se-ia viável reduzir emissões relacionadas com a mudança dos padrões de mobilidade urbana apenas a partir de 2020.

A adoção de sistemas inteligentes de gestão da mobilidade urbana, por seu turno, poderia ser implementada no curto prazo e seria atribuída aos mesmos atores responsáveis pelas condições de infraestrutura relacionadas à medida.

8.2.2.2 OUTROS MODAIS

Já foi comentada a importância da participação de outros modais além do rodoviário na matriz de transportes brasileira, dada uma maior eficiência energética e vantagem econômica, principalmente no que tange ao transporte de carga. Uma integração maior de outras modalidades necessita de obras de infraestrutura para permitir acesso a diferentes vias e complementar a chegada a portos e outros pontos de embarque e desembarque de maneira eficiente.

Investimentos nos modais hidroviário e ferroviário, em especial com conclusão das obras da Ferrovia Norte-Sul, permitindo a ligação entre Barcarena/PA e Rio Grande/RS, devem ser priorizados. Além disso, deve-se fomentar a construção de ferrovias de bitola larga, ou seja, com maior capacidade para o transporte de carga. Finalmente, a construção de plataformas logísticas multimodais e a modernização e ampliação da infraestrutura portuária, associadas à implementação de sistemas inteligentes de transportes, responsáveis por coletar informações e aplicar tecnologias de comunicação em todos os modais, devem ser consideradas. Compreende-se que a implementação deve ser atribuída a ministérios, governos estaduais, bancos públicos e empresas privadas, e o monitoramento deve ser realizado por instituições e agências federais relacionadas aos modais, em particular transporte de cargas. Em face da complexidade das ações, compreende-se que o horizonte de implementação não deve ser inferior a cinco anos.

A seguir, serão descritas, com maior grau de detalhamento, propostas para os modais ferroviário e hidroviário, principais alternativas ao transporte rodoviário de carga.

a) Ferroviário

As propostas estabelecidas para o modal ferroviário provêm de uma análise realizada em relatórios anteriores acerca do transporte no Brasil. Algumas foram embasadas por outros relatórios e estudos, como o desenvolvido pelo Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração da Universidade Federal do Rio de Janeiro e pela Confederação Nacional do Transporte (COPPEAD/CNT, 2002), de modo a estimular o crescimento da participação do modal.

Para a modernização das ferrovias, propõe-se um modelo de financiamento que permita reduzir o custo médio de capital e viabilize investimentos privados em ativos ferroviários. Nesse âmbito, a Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF) propõe estimular a realização de investimentos na modernização e ampliação das ferrovias brasileiras, na venda de máquinas, equipamentos e outros bens e no mercado interno ou externo, quando adquiridos ou importados pelas concessionárias para uso exclusivo em ferrovias. Haveria, então, suspensão do IPI, imposto de importação, PIS e Cofins e ICMS. Os órgãos reguladores da atividade ferroviária devem ser responsáveis por criar regras que propiciem o investimento das concessionárias em fatores que melhorem a eficiência do modal, dado que não se podem esperar novos investimentos e melhoria de um sistema que não ofereça perspectivas de saúde financeira para seus operadores.

Para o aprimoramento do sistema de gestão das atividades, destaca-se a importância do aperfeiçoamento dos indicadores de desempenho monitorados pelo poder concedente: a proposta é modificar alguns indicadores de modo a permitir controle mais efetivo do desempenho do transporte ferroviário. Dois exemplos seriam:

- a)** O índice de acidentes em trem x km contemplado em relatórios da ANTT que não leva em consideração os tamanhos dos comboios, que são muito variados no sistema ferroviário brasileiro. Uma medição de acidentes por tonelada-quilômetro útil transportada pode ser considerada mais adequada do que o índice local;
- b)** Hierarquização dos acidentes por nível de gravidade. Atualmente, considera-se “acidente” como sendo apenas “todo evento que para o tráfego”.

Para garantir que o sistema ferroviário não se deteriore nos últimos anos de concessão, devem-se ressarcir os investimentos em superestrutura feitos pelas concessionárias ao final do período de concessão. Com a finalidade de aliviar gargalos de infraestrutura e aumentar a eficiência operacional, propõe-se a recuperação e construção, por meio de parecerias público-privadas, de alternativas aos trechos críticos.

Para a criação do cenário BC proposto, além de adoção de novas tecnologias para o transporte ferroviário, foi sugerida a migração de determinadas *commodities* transportadas originalmente pelo modal rodoviário para que sejam movimentadas por ferrovias, incentivando a mudança de modal. Os produtos foram escolhidos por apresentarem maior peso na matriz de transporte de carga e conformidade maior com o transporte a longas distâncias para cargas pesadas, como ocorre em trens, devido ao seu alto volume e baixo valor agregado: soja, minério de ferro, minerais metálicos não ferrosos e minerais não metálicos, sendo que minério de ferro e soja foram apresentados como produtos com maior potencial de migração em relação à quantidade de toneladas-quilômetro úteis transportadas. Inclusive, é possível ver o peso do minério de ferro no setor de transportes ao comparar a diferença entre a matriz de carga com e sem a sua presença (Figura 175).

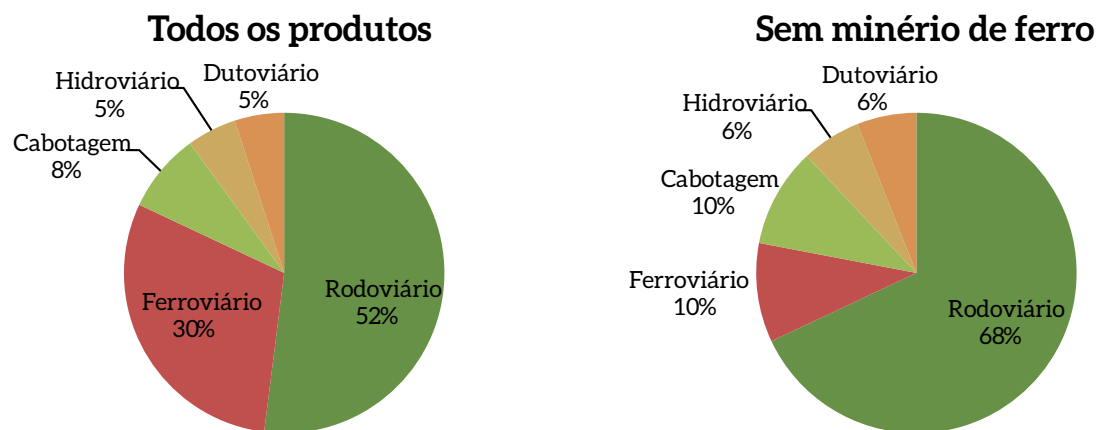


Figura 175 – Distribuição Modal da Matriz Brasileira com e sem Minério de Carga – 2011

Fonte: BRASIL/SPNT, 2012

Desse modo, propõe-se a priorização da expansão da malha ferroviária e infraestrutura de suporte das regiões que apresentam a maior produção de minério de ferro (Minas Gerais e Pará) e soja (Mato Grosso) para que seja possível o escoamento de grande parte da produção por trens e uma consequente redução da dependência de caminhões.

Também se deve falar sobre a identificação de projetos de desenvolvimento em novas tecnologias no mercado nacional e internacional por ser vital para a expansão da capacidade e operações do modal. Ao mesmo tempo, é necessário o fomento de uma produção nacional competitiva e flexível, em termos de qualidade, preço e prazo.

Outra proposta é a desoneração de importações nas áreas não competitivas, incluindo reavaliação das alíquotas de importação. Essas últimas propostas são os desafios encontrados pela ANTF, responsável por promover o investimento e o aprimoramento do transporte ferroviário no país (ANTF, 2013).

Segurança é um fator-chave para a realização das operações e é uma preocupação inerente às atividades ferroviárias de outros países, como pôde ser visto nas experiências internacionais da Europa e da Austrália no capítulo sobre políticas. Sistemas de segurança que apoiem a realização das operações, a salubridade dos operadores, a proteção da carga transportada e que não afetem comunidades próximas a determinados trechos da malha ferroviária ajudam a estimular o uso desse modal como alternativa aos caminhões.

b) Hidroviário

Para um melhor transporte por hidrovias, faz-se necessário um estudo, a ser realizado pela companhia de docas de cada estado responsável, para a identificação de possíveis rotas de navegação que possam ser identificadas, sobretudo para a movimentação de cargas. Um exemplo foi a análise feita pela Companhia Docas do Estado de São Paulo (Codesp) e pela Fundação de Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia (FDTE) que identificou possíveis rotas e áreas estratégicas no porto de Santos que possam abrigar terminais multimodais, essenciais para a integração de diferentes modalidades. Após essa identificação, são necessárias intervenções que promovam a viabilização da navegabilidade por esses cursos. Tais obras geralmente incluem dragagem dos rios, alterações das pontes e sinalizações das vias navegáveis de maneira a oferecer condições de segurança às embarcações e suas cargas (CHAVES et al., 2014).

Outra ação proposta é referente aos incentivos fiscais ao transporte de carga por hidrovias. É necessário mudar a cultura de investimentos nessa via, de modo a torná-la mais atrativa perante os outros modais.

Com maior uso das hidrovias, para que sejam respeitadas as normas de qualidade dos recursos hídricos e de áreas de influência das hidrovias e, assim, promover o transporte por hidrovias de maneira sustentável, poderiam ser utilizados sistemas e ferramentas de controle e diagnóstico próprios de gestão de projetos. Uma metodologia proposta poderia ser o *plan-do-check-act* (PDCA), que consiste em, respectivamente, planejar (estabelecendo processos e objetivos que obedeçam à política ambiental), executar (implementar esses processos), verificar (monitorar a ação) e agir (promover melhoria contínua do desempenho). Também poderia ser exigida uma norma ISO 14001, de gestão ambiental, por conter elementos do Sistema de Gestão Ambiental (SGA) (SANTANA, 2008).

Entrando em conformidade com o cenário BC desenvolvido e de maneira análoga ao modal ferroviário, propõe-se a migração de determinados produtos, como soja, minério de ferro e minerais não metálicos, do modal rodoviário para o hidroviário por serem mais adequados ao perfil de entrega de grandes volumes e grandes distâncias proporcionado pelo transporte por cabotagem. Dessa maneira, seria indicada a priorização de portos e bacias próximas a regiões produtoras desses bens.

8.2.3 BIOCOMBUSTÍVEL

Boa parte dos combustíveis alternativos depende ainda de políticas específicas para sua inserção no mercado. Seja por causa dos ganhos de escala, pelo custo de produção ou pelo fato de as externalidades geradas, em especial as ambientais, não serem corretamente computadas, o fato é que o custo dos biocombustíveis, em sua maioria, é mais caro que o seu equivalente fóssil, quando não há incentivos. Nesse sentido, propõe-se maior suporte a programas de P&D, tendo em vista a atual corrida internacional para estabelecer o futuro padrão de produção de álcool. A tendência é a produção de bioetanol a partir de qualquer biomassa vegetal com celulose – como fibra, palha e bagaço da própria cana –, de modo que vários países que antes não produziam cana-de-açúcar por causa do clima tenham a chance de entrar no mercado a partir dessa matéria-prima mais indiferenciada.

Especificamente, propõe-se fomentar a produção sustentada e o consumo de biocombustíveis, a criação de um fundo setorial para o financiamento da P&D de etanol e biodiesel de segunda geração; novas tecnologias visando ao aumento da produtividade da produção de etanol e novas rotas de produção do biodiesel; diversificação da produção canavieira; fomento à diversificação da matriz oleaginosa para a produção de biodiesel. Mais do que isso, devem-se propor incentivos fiscais e de taxaçaõ adequados para os biocombustíveis em detrimento dos combustíveis fósseis. No caso, a estratégia de precificação do carbono seria adequada para incentivar o aumento do uso de etanol e biodiesel. Esses instrumentos deveriam ter seus impactos estudados no curto prazo, com horizonte de aplicação das políticas a partir de 2020. A implementação seria uma atribuição do governo federal, em particular dos ministérios vinculados à formulação da política econômica e fiscal.

Entretanto, o ponto mais importante no que tange à maior inserção de biocombustíveis no setor de transportes nacional refere-se à elaboração de uma política mais concreta focada na substituição de combustíveis fósseis. Atualmente, pode-se observar uma política dúbia, em que o governo aposta, ao mesmo tempo, no petróleo e nos biocombustíveis, o que, no longo prazo, cria uma sinalização confusa aos atores públicos e privados envolvidos no setor.

Particularidades regionais também devem ser consideradas na formulação de instrumentos que incentivem maior uso de biocombustíveis. O uso cativo de biodiesel puro na frota agrícola poderia ser incentivado, em particular nas regiões Norte e Centro-Oeste, que se encontram distantes das refinarias produtoras de óleo diesel e que, por outro lado, concentram a produção de oleaginosas preferenciais para a produção do biocombustível, como gordura bovina, palma e soja. Tipicamente, a disponibilização de crédito pelos bancos de fomento para a produção em nível local deveria ser considerada. Mais do que isso, campanhas que fomentem a formação de cooperativas de produção de biodiesel poderiam ser implementadas para que órgãos de extensionismo rural, Embrapa, Sebrae, sejam atores relevantes. As universidades federais localizadas nessas regiões poderiam ministrar cursos para as cooperativas, tratando de aspectos técnicos da produção de biodiesel. Compreende-se que essas medidas poderiam ser adotadas no curto prazo, portanto, a partir de 2017.

Por fim, ressalta-se a necessidade de mais investimentos em infraestrutura logística para distribuição de biocombustíveis por todo o país, bem como de aperfeiçoamento da regulação ambiental a partir da determinação de padrões de emissão, visando principalmente ao controle de emissões locais.

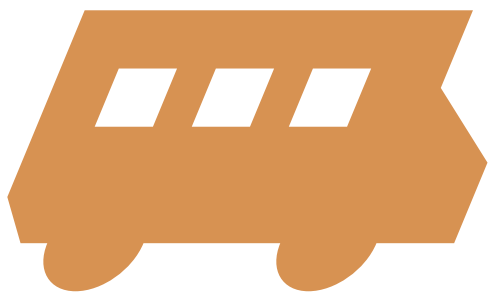
8.3 SÍNTESE DOS SUBSÍDIOS PARA A FORMULAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE POLÍTICAS PÚBLICAS VISANDO À ADOÇÃO DAS ATIVIDADES DE BAIXO CARBONO NO SETOR DE TRANSPORTES

Quadro 25 – Quadro-Síntese dos Subsídios para a Elaboração de Instrumentos de Políticas Públicas para Aplicação das Medidas Propostas

Medidas	Perfil	Atividades de Baixo Carbono	Subsídios para a Formulação de Instrumentos de Política Pública
Medidas incrementais	Rodoviário passageiro	Automóveis e comerciais leves até 30% mais eficientes	- Obrigatoriedade da etiquetagem relativa à eficiência energética para veículos novos e usados - Taxação de veículos ineficientes e redução de impostos para veículos eficientes (feebate) - Criação de metas de eficiência energética, associada com mercado de crédito de eficiência - Estabelecimento de penalidades econômicas ao descumprimento de metas
	Rodoviário passageiro	Ônibus até 30% mais eficientes	
	Rodoviário passageiro	Motocicletas até 15% mais eficientes	
	Rodoviário passageiro	Inserção de automóveis a bateria e plug-in flex	- Suporte a programas de P&D para desenvolvimento veicular e de baterias - Abordagem multimodal da eletrificação veicular - Criação de zonas de baixa emissão de poluentes em centros urbanos - Incentivos econômicos à substituição da frota de táxis a combustíveis por modelos elétricos e a célula a combustível - Incentivos locais para incentivar o uso de veículos a bateria e plug-in flex, como a isenção a pedágios, livre acesso à eletricidade e estacionamentos gratuitos - Planejamento regional visando à integração dos veículos elétricos e a hidrogênio nos sistemas de transportes - Campanhas de conscientização de crianças e jovens acerca dos benefícios ambientais associados ao uso de novas tecnologias - Compartilhamento de veículos e recargas elétricas - Priorização das tecnologias para a visitação de pontos turísticos
	Rodoviário carga	Comerciais leves e caminhões mais eficientes	- Obrigatoriedade da etiquetagem relativa à eficiência energética para caminhões novos e usados - Taxação de caminhões ineficientes e redução de impostos para caminhões eficientes (feebate) - Criação de metas de eficiência energética, associada com mercado de crédito de eficiência - Estabelecimento de penalidades econômicas ao descumprimento de metas - Sucateamento obrigatório para caminhões com mais de 20 anos de uso
Medidas incrementais	Ferrovário carga	Trens mais eficientes: redução do arrasto, carga compacta, maquinário mais eficiente e condução ecoconsciente	- Criação de metas de eficiência energética, associadas com mercado de crédito de eficiência - Redução de impostos para máquinas e equipamentos com padrões de eficiência do tipo "A" - Criação de um programa de renovação das embarcações - Estabelecimento de penalidades econômicas ao descumprimento de metas
	Aéreo passageiro Aéreo carga	Aeronaves mais leves e com motores mais eficientes	
	Hidroviário passageiro Hidroviário carga	Embarcações mais eficientes: limpeza do casco e hélice; piloto automático; tecnologia de combustão common rail; sistema de geração de energia solar fotovoltaica; planejamento da rota com previsão climática; redução das resistências hidro e aerodinâmica; renovação de embarcações	
	Hidroviário passageiro Hidroviário carga	Embarcações mais eficientes: limpeza do casco e hélice; piloto automático; tecnologia de combustão common rail; sistema de geração de energia solar fotovoltaica; planejamento da rota com previsão climática; redução das resistências hidro e aerodinâmica; renovação de embarcações	

Medidas	Perfil	Atividades de Baixo Carbono	Subsídios para a Formulação de Instrumentos de Política Pública
Medidas avançadas	Rodoviário passageiro	Veículos a célula a combustível	- Suporte a programas de P&D, com captação de recursos junto ao BID, GCF e GEF - Criação de um órgão de pesquisa e implementação de tecnologias-chave de baixo carbono - Elaboração de roadmaps relacionados às tecnologias-chave de baixo carbono
	Rodoviário passageiro	Ônibus movidos a etanol	
	Hidroviário passageiro Hidroviário carga	Embarcações com towing kite	
	Rodoviário carga	Veículos híbrido-hidráulicos de carga	
	Aéreo passageiro Aéreo carga	Aviões movidos a energia solar	
Mobilidade urbana	Rodoviário passageiro Ferroviário passageiro	Priorização de modais não motorizados sobre motorizados; expansão de faixas exclusivas de ônibus (BRT); investimentos na ampliação e em melhorias de sistemas sobre trilhos de alta e média capacidade; implantação de TAV e trens regionais; migração do modal rodoviário de carga para ferroviário e hidroviário	- Integração dos planos nacionais, estaduais e municipais relacionadas a mobilidade urbana - Promoção à participação popular e de stakeholders na formulação de planos relacionados a mobilidade urbana - Obrigatoriedade da gestão de demanda por mobilidade urbana em cidades com mais de 300 mil habitantes - Capacitação das autoridades locais em sustentabilidade urbana - Subsídios a tarifas de transporte por ônibus, trens e metrô - Restrição e controle ao acesso de veículos motorizados, em grandes centros urbanos, por meio da criação de estacionamentos em regiões adjacentes e pedágios urbanos - Estabelecimento de padrões, monitoramento e controle de poluentes - Expansão de faixas exclusivas de ônibus e implantação BRT e VLT de forma a integrar regiões metropolitanas - Controle da circulação e operação do transporte de carga nas grandes cidades - Expansão de linhas de metrô - Expansão de ciclovias e ciclofaixas - Construção de terminais de integração - Criação de uma plataforma virtual relacionada a horários, terminais, trajetos e condições de tráfego do transporte público
	Rodoviário carga Ferroviário carga Hidroviário carga	Diversificação da matriz de transporte de carga	- Novo modelo de financiamento para reduzir custo médio de capital e viabilizar investimentos privados - Suspensão do IPI, imposto de importação, PIS e Cofins e ICMS para máquinas e equipamentos relacionados ao transporte de carga - Aperfeiçoamento dos indicadores de desempenho - Ressarcir os investimentos em superestrutura feitos pelas concessionárias ao final do período de concessão - Priorização de investimentos nos modais hidroviário e ferroviário, em especial com conclusão das obras da Ferrovia Norte-Sul - Fomento à construção de ferrovias de bitola larga - Construção de plataformas logísticas multimodal e modernização e ampliação da infraestrutura portuária
Biocombustíveis	Rodoviário passageiro e carga	Aumento do consumo e fomento à produção local de biocombustíveis	- Criação de um fundo setorial para o financiamento de ações relacionadas à cadeia produtiva do etanol e biodiesel - Precificação do carbono - Maior adição dos biocombustíveis no transporte público de passageiros - Permissão do uso de biodiesel puro na frota agrícola - Formação de cooperativas de produção de biodiesel - Ministrar cursos para as cooperativas tratando de aspectos técnicos da produção de biodiesel

Fonte: Elaboração própria



Considerações Finais

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As mudanças climáticas impõem desafios às nações no sentido de encontrar meios sustentáveis de produzir e mobilizar recursos, pessoas e serviços. Nesse intenso processo de transformação, cria-se oportunidade para que se consiga promover integração de políticas públicas setoriais, tradicionalmente pouco articuladas, para apoiar o fomento da inovação tecnológica e promover nações mais justas, humanas e com consumo menos intensivo de carbono. Essa transição será um desafio maior para países em desenvolvimento, os quais não dispõem de recursos para investir em todos os projetos necessários para adaptação a essa nova realidade.

Nesse sentido, este estudo teve por objetivo auxiliar o governo brasileiro a reforçar a sua capacidade técnica de apoiar a implementação de ações de mitigação de emissões de GEE no setor de transportes. Para tal, desenvolveu metodologia para projeção de longo prazo do consumo e das emissões do setor, o que permitiu a construção de três diferentes cenários para o período 2012-2050.

O primeiro cenário, denominado de referência, apresenta características de base de mercado, sem maiores mudanças qualitativas e que mantém o ritmo natural de incorporação de tecnologia. Ou seja, a principal característica desse cenário é contextualizada pela manutenção de tendências setoriais já em curso, não havendo maiores alterações estruturais no horizonte de análise. O cenário BC busca incorporar programas, políticas públicas, ações e estratégias que podem ser desenvolvidas no setor de transportes com o objetivo de reduzir as emissões de GEE, com foco em maior uso de biocombustíveis, valorização de modais menos intensivos em energia e efficientização da frota de veículos. O cenário BC+I, por seu turno, tem as características básicas do cenário BC com a consideração da entrada de tecnologias inovadoras do setor, ou seja, tecnologias que estão tecnicamente desenvolvidas, ou em desenvolvimento, porém com elevado custo de implementação (barreiras econômicas) e restrições técnicas à difusão.

A Figura 176 e a Figura 177 resumem a evolução do consumo e das emissões de GEE, no horizonte 2050, nos cenários considerados.

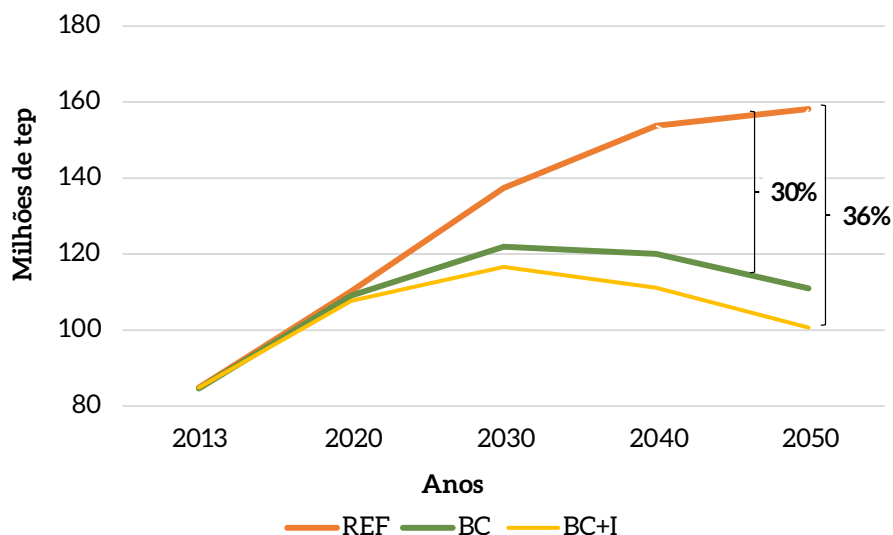


Figura 176 – Consumo Energético

Fonte: Elaboração própria

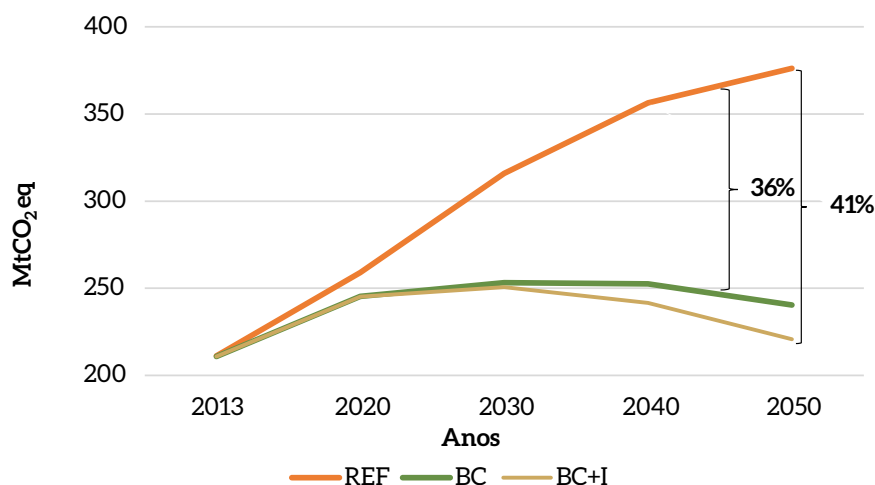


Figura 177 – Emissões de GEE

Fonte: Elaboração própria

A migração de um cenário referencial para um cenário BC permitiria a redução em 30% do consumo energético do setor e, no caso de um cenário BC com características inovadoras, o percentual de redução do consumo alcançaria 36%. Do ponto de vista de emissões de GEE, a redução, em relação ao cenário REF, é de 36% no cenário BC e de 41% no cenário BC+I. A Figura 178 e a Figura 179 exibem os ganhos de redução de consumo e de emissão por blocos de medidas considerados para o cenário BC: eficiência energética (EE), mudança modal (MM) e biocombustíveis (biocomb). Verifica-se um equilíbrio entre os ganhos referentes à eficiência energética e à mudança modal.

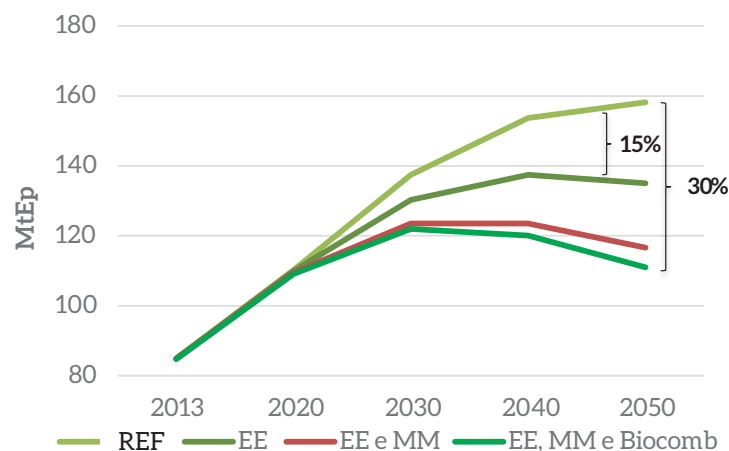


Figura 178 – Decomposição dos Efeitos de Redução do Consumo Energético – Cenários de Referência e de Baixo Carbono

Nota: EE – Eficiência Energética. MM – Mudança Modal. Biocomb – Biocombustíveis.

Fonte: Elaboração própria

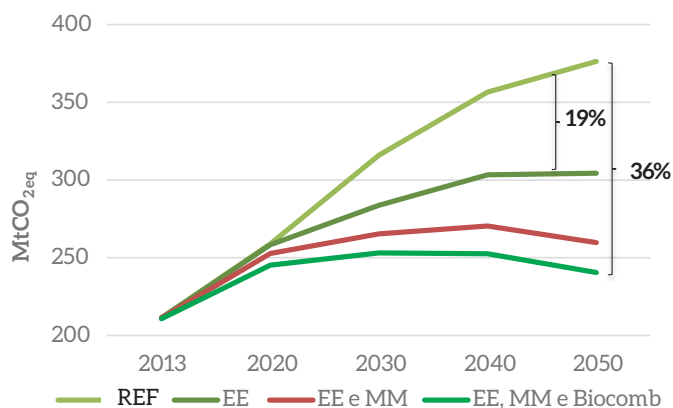


Figura 179 – Decomposição dos Efeitos de Redução das Emissões – Cenários de Referência e de Baixo Carbono

Nota: EE – Eficiência Energética. MM – Mudança Modal. Biocomb – Biocombustíveis.

Fonte: Elaboração própria

Assim, destaca-se que a utilização de novas tecnologias e a gestão de tráfego serão decisivas para a redução das emissões do setor de transportes. A corrida à mobilidade sustentável é global, de modo que adiar essas iniciativas poderá condenar o setor à insustentabilidade. A infraestrutura molda a mobilidade, porém nenhuma transformação ocorrerá sem o sustentáculo de uma rede articulada de *stakeholders*. Em geral, o investimento em infraestrutura de transporte contribui para o crescimento econômico, criando riqueza e emprego, incrementando as trocas comerciais, a acessibilidade geográfica e a mobilidade. Todavia, deve ser planejado de forma a maximizar as externalidades positivas e possíveis cobenefícios, bem como minimizar as externalidades negativas, principalmente sobre o meio ambiente.

A análise do espectro de instrumentos de políticas públicas necessários para implementar os cenários de baixo carbono requer o diagnóstico preciso dos problemas e a identificação dos objetivos a serem perseguidos. É necessário, portanto, esclarecer quais são os obstáculos que devem ser enfrentados, aspecto fundamental para que ocorra uma transição de baixo carbono no setor. No Brasil, as autoridades enfrentam desafios que incluem restrições orçamentárias, resistência política, barreiras administrativas e legais, bem como oposição da opinião pública. Outras barreiras gerais que se apresentam são restrições físicas, capacidade institucional e questões jurisdicionais. Nesse sentido, políticas públicas no setor de transportes desempenham papel fundamental na formação e no rumo do mercado e, portanto, devem ser bem planejadas, tendo em vista que podem distorcer decisões em favor de modais menos eficientes, por exemplo, via subsídios a combustíveis fósseis ou até mesmo pela falta de informação sobre demais alternativas de transporte, cadeia de fornecimento e condições de financiamento.

As restrições financeiras manifestam-se pelos altos custos iniciais, ou de capital, necessários para infraestrutura, ferramentas de gestão da demanda e programas de eficiência energética. Historicamente, o financiamento tem sido destinado, predominantemente, para a construção e manutenção de estradas (IEA, 2013c) por meio de impostos gerais ou receitas específicas, como impostos sobre os combustíveis. Desse modo, os projetos têm sido tradicionalmente financiados com verbas públicas, embora não se possa deixar de destacar o crescente papel de bancos multilaterais e instituições financeiras na diluição dos riscos do setor. Atualmente, países e bancos têm percebido a necessidade crescente de soluções mais eficientes e têm direcionado seus financiamentos para o desenvolvimento de modais ferroviários e hidroviários, bem como para o transporte público e infraestrutura para caminhar e andar de bicicleta nas cidades.

Para alcançar maior eficiência no transporte, diversas abordagens seriam possíveis – tratar da eficiência da frota existente de automóveis é uma possibilidade, por exemplo. Todavia, seria antiprático e custoso aumentar a eficiência dos veículos em circulação ao mesmo tempo em que a frota de veículos se renova em um intervalo de tempo em torno de dez a 15 anos, o que favorece uma política voltada a novos entrantes (IEA, 2012c).

No transporte de carga, há alternativas que aumentam a eficiência do setor e contribuem para a mitigação de GEE. Além de medidas incrementais na frota de caminhões, como melhorias na aerodinâmica, nos motores, na redução de massa etc., e sucateamento, incentivos a mudança modal entre o transporte rodoviário e o ferroviário são essenciais para alcançar bons resultados. Uma das principais barreiras para o desenvolvimento da logística nacional está relacionada com deficiências encontradas na infraestrutura de transportes. Problemas de logística afetam a competitividade, principalmente no modal ferroviário, tendo em vista a existência de um *lock-in* na infraestrutura rodoviária no Brasil, o que acaba desestimulando o transporte por outros modais. Atualmente, há gargalos físicos e operacionais no transporte ferroviário que precisam ser superados: as locomotivas apresentam idade média avançada e encontram-se barreiras tarifárias na aquisição de equipamentos no exterior. Além disso, ressalta-se a baixa disponibilidade de terminais multimodais, o que sinaliza a falta de integração entre os modais no país, principalmente em portos e aeroportos.

Para a modernização das ferrovias, de modo a incentivar a mudança modal, é necessário um modelo de financiamento que permita reduzir o custo médio de capital e que viabilize investimentos privados. A recuperação e a construção de alternativas aos trechos críticos devem ocorrer por meio de parcerias público-privadas, de modo que se superem os gargalos de infraestrutura e aumente a eficiência operacional. Os órgãos reguladores da atividade ferroviária devem ser responsáveis por criar regras que propiciem o investimento das concessionárias em fatores que melhorem a eficiência do modal, dado que não se podem esperar novos investimentos e melhoria de um sistema que não ofereça perspectivas de saúde financeira para seus operadores. Para estimular a realização de investimentos para modernização e expansão das ferrovias nacionais, é necessário tomar medidas no sentido de não onerar os investidores, como redução de impostos, principalmente para máquinas, equipamentos e outros ativos de uso exclusivo do modal. Ademais, o governo deve ressarcir os investimentos em superestrutura feitos pelas concessionárias de modo a não deteriorar o sistema ferroviário ao final do período de concessão. Nesse âmbito, as *commodities* que apresentam maior peso na matriz de transporte de carga e conformidade com o transporte de longas distâncias, devido ao seu alto volume e baixo valor agregado, são o minério de ferro e a soja, o que sinaliza as regiões de maior potencial de expansão da malha, quais sejam: Minas Gerais e Pará, para o transporte de minério de ferro, e Mato Grosso, para o transporte de soja. Desse modo, é possível o escoamento de grande parte da produção por trens e consequente redução da tradicional dependência de caminhões.

A ênfase nas rodovias deixa o transporte de cargas mais caro, principalmente para grandes volumes e grandes distâncias. O incentivo à mudança modal, portanto, traz cobenefícios econômicos, como a geração de empregos e a redução de custos operacionais, a partir de uma produção nacional competitiva e flexível, em termos de qualidade, preço e prazo. Destacam-se também possíveis melhorias na segurança energética, dada a diversificação da matriz de transporte e consequente redução da dependência de petróleo por meio da utilização de um modal mais eficiente. Em termos sociais, podem-se alcançar maiores índices de segurança nas estradas, devido ao menor tráfego de caminhões e redução de acidentes. Por fim, a expansão da infraestrutura de transporte por ferrovias contribuiria para a redução do uso do solo, bem como traria benefícios ao ecossistema e à biodiversidade dada a redução da poluição do ar.

Outra importante opção de mitigação de GEE no setor de transportes nacional é o incentivo à mudança modal entre automóveis e transporte público, principalmente ônibus urbanos. As barreiras existentes para que haja avanço na mudança modal passam pela falta de disponibilidade de transporte público adequado e de qualidade para a população, o que reduz a produtividade em vista de maiores tempos de deslocamentos, bem como por aspectos culturais, em que se destaca a dependência social a automóveis. Nesse sentido, percebe-se uma falta de crença quanto ao valor da educação para a mudança comportamental da população, o que cria oposição quanto ao possível aumento dos custos de transporte e de restrições de estacionamento em determinados locais das cidades. Outras barreiras importantes são o suporte regulatório insuficiente e a falta de capacitação quanto ao conceito de mobilidade urbana sustentável, o que resulta numa visão simplista do termo “urbano”, sem reconhecer que as decisões de investimentos têm grande impacto no comportamento das viagens dos cidadãos. Utilização inadequada dos recursos, subaproveitamento de modais, falhas na sinalização de preços, falta de informação aos usuários e não inclusão da mobilidade urbana na agenda política são aspectos que devem ser corrigidos pela administração das metrópoles brasileiras.

A principal forma de superar tais barreiras é a total implementação do Plano Nacional de Mobilidade Urbana, cujas diretrizes estão voltadas para a mudança transformacional em vez de intervenções que reforçam as tendências de mobilidade existentes centradas na propriedade e no uso de veículos motorizados particulares. Os instrumentos de gestão de demanda aplicados nas cidades com mais de 300 mil habitantes podem vir a contribuir para a efetiva mudança modal de veículos particulares para o transporte público de massa. Dentre eles, destacam-se a restrição e o controle de acesso de veículos motorizados, principalmente em centros urbanos, por meio da implantação de pedágios urbanos, cuja receita deve ser aplicada exclusivamente em infraestrutura urbana de transporte público coletivo⁷⁴ e transporte não motorizado⁷⁵ (substitutos do transporte individual), bem como para o financiamento do subsídio público de tarifas. Em paralelo, deve-se aperfeiçoar a fiscalização referente à atual qualidade do transporte público, de modo a exigir critérios mais transparentes e objetivos de produtividade e eficiência que justifiquem as tarifas cobradas. Estipulação de padrões, monitoramento e controle de poluentes também podem contribuir para a redução do tráfego de veículos em pontos específicos das cidades (GIZ, 2009). Em termos de incentivos à mudança comportamental da população, as autoridades locais devem ser obrigadas a informar de maneira gratuita e acessível os pontos de embarque e desembarque, bem como itinerários, horários, tarifas e modos de interação com demais modais, pois se trata de um direito do usuário, o que pode ser alcançado de maneira fácil e acessível por meio da criação de uma plataforma virtual (aplicativo para **smartphones**). Por fim, vislumbra-se como alternativa à redução do tráfego a elaboração de uma política de engajamento social que vise coordenar ações entre os principais produtores de tráfego locais, isto é, empresas, escolas, hospitais, escritórios governamentais e universidades, no intuito de elaborar planos de viagem, abrir a possibilidade de realizar trabalho de casa e sugerir os modais adequados para os diferentes destinos.

A mobilidade urbana deve ser um dos temas prioritários da agenda em prol de uma sociedade do bem-estar com estilos mais sustentáveis de vida. Cidades onde o deslocamento de seus moradores é feito por meio de serviços de transporte e infraestrutura de alta qualidade geram impactos positivos em todos os aspectos: social, ambiental, econômico e individual. Nesse sentido, destaca-se como principal cobenefício oriundo de políticas voltadas para a mobilidade urbana a melhoria da qualidade de vida da população, tanto por melhorias na acessibilidade quanto pelo aumento da produtividade, tendo em vista a redução do tempo de viagem a partir da redução de congestionamentos, o que pode ser convertido em práticas de cuidado consigo próprio via prática de exercícios físicos, para lazer e para atividades de desenvolvimento pessoal e profissional. Ademais, também se alcançam benefícios ao ecossistema e à biodiversidade pela redução da poluição do ar e por um menor uso do solo.

Outra importante opção para alcançar maiores níveis de eficiência é incentivar a inserção de automóveis híbridos, automóveis a bateria e automóveis *plug-in flex* na frota nacional. No entanto, há uma série de barreiras que, muitas vezes, têm de ser superadas antes da implementação de medidas para promover a mobilidade em direção à eletrificação da frota. Dentre elas, destacam-se os altos custos dessas novas tecnologias, muito explicado pela necessidade de escassos recursos naturais para a produção de componentes, como baterias, o que esbarra em restrições financeiras de agentes públicos e privados. Nesse sentido, insegurança jurídica e regulamentações insuficientes desempenham

74 Expansão de faixas exclusivas de ônibus, implantação de *bus rapid transit* (BRT) até regiões metropolitanas, bem como concluir a expansão ou construir linhas de metrô nas cidades com população superior a 1 milhão de habitantes.

75 Expansão de ciclovias e ciclofaixas, bem como melhorias na infraestrutura de calçadas (iluminação, sinalização, segurança).

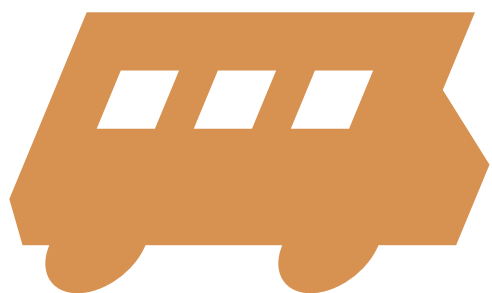
também um papel fundamental. Ademais, vale ressaltar o *lobby* da indústria automobilística em prol do uso de derivados de petróleo, o que contribui para fortalecer o *lock-in* tecnológico existente no setor. A infraestrutura convencional ainda não está adaptada para uma transição em direção ao transporte eletrificado, de modo que há insuficientes postos de recarga elétrica padronizados, por exemplo. Por fim, cabe ressaltar a falta de experiência na implantação de instrumentos de planejamento pertinentes à integração da mobilidade elétrica no Brasil.

Os instrumentos de políticas públicas que podem ajudar a resolver esses problemas passam por medidas em nível federal e local. Primeiramente, o suporte a programas de P&D continua sendo essencial a fim de garantir automóveis com maior autonomia, dirigibilidade e baterias menos onerosas. Muitos países estão implementando mecanismos de apoio em nível nacional para incentivar o uso de veículos de baixa emissão ou emissão zero. No curto prazo, são necessários investimentos da indústria automobilística e oferta atraente para usuários, na maioria das vezes, com isenção de impostos. No entanto, mesmo com incentivos nacionais, a adoção do transporte, por meio de veículos elétricos, pode não ser atraente. O processo de eletrificação veicular precisa ser considerado a partir de uma perspectiva mais ampla, incluindo uma abordagem multimodal, de modo a integrar ônibus, motocicletas e trens elétricos com os automóveis. Assim, os governos devem auxiliar cidades e regiões no desenvolvimento de modelos de negócios sustentáveis que contribuam para melhorias na infraestrutura necessária para a adequada circulação de veículos elétricos (IEA, 2015). As autoridades locais podem desempenhar papel de apoio, principalmente, na fase inicial de implantação das políticas. Para superar tais desafios, existem medidas disponíveis às autoridades locais que podem ser utilizadas para complementar os incentivos em nível nacional, como criação de zonas de baixa emissão, táxis elétricos, engajamento da nova geração, bem como modelos de negócio baseados na economia compartilhada.

A eletrificação da frota traz importantes cobenefícios, muitas vezes negligenciados, como redução da dependência do petróleo, o que contribui para melhorias na segurança energética nacional. Nesse sentido, também vale mencionar a possível redução de custos operacionais no setor, tendo em vista a redução dos custos referentes a combustíveis. Além de cobenefícios políticos e econômicos, podem-se alcançar benefícios à saúde pública, ao ecossistema e à biodiversidade, dada a redução de poluentes atmosféricos. É importante destacar a possibilidade de propagação da tecnologia para os demais setores, como baterias para eletroeletrônicos.

Impende destacar que a análise setorial considerada neste relatório não permite a detecção de não aditividades de potenciais de mitigação que podem derivar, por exemplo, da competitividade por insumos e tecnologias visando à redução de emissões de GEE. É o caso dos biocombustíveis, que demandam o insumo terra para sua produção a partir de oleaginosas e cana-de-açúcar. Mais do que isso, a avaliação setorial desconsidera efeitos da adoção de medidas isoladas de mitigação sobre o sistema energético, tal qual a possível intensificação de carbono do setor elétrico a partir da suposição de uma maior entrada de veículos elétricos como atividade para reduzir emissões no setor. Em suma, trata-se de uma limitação da modelagem setorial, motivo pelo qual o projeto se utiliza da técnica de construção integrada de cenários, da qual resultam estimativas robustas de potenciais e custos setoriais de mitigação de emissões de GEE.

Outra limitação deste estudo resulta das projeções econômicas consideradas na construção dos cenários. Para tratar essa questão, tendo em vista a transversalidade e a relevância das variáveis macroeconômicas para os cenários setoriais de emissões, será considerada uma segunda visão de mento setorial do PIB no âmbito da modelagem integrada, a qual considerará os efeitos de curto e médio de prazo do recente contexto econômico nacional.



Referências

REFERÊNCIAS

- ADAMSON, K. A. Fuel cell basics. In: *Stationary Fuel Cells*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007, p. 7-28.
- AHLUWALIA, R. K.; HUA, T. Q.; PENG, J. K. On-board and Off-board performance of hydrogen storage options for light-duty vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 37, n. 3, p. 2891-2910, fev. 2012.
- AIR TRANSPORT ACTION GROUP – ATAG. *Beginner's guide to aviation efficiency*. 2010. Disponível em: <<http://www.atag.org/component/downloads/downloads/59.html>>. Acesso em: 31 out. 2015.
- AIR TRANSPORT DEPARTMENT – ATD. *Fuel and air transport*. Cranfield, UK: ATD, Cranfield University, 2009. Disponível em: <http://ec.europa.eu/transport/modes/air/doc/fuel_report_final.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2015.
- ALMEIDA, A. F. S. *A importância dos biocombustíveis na matriz energética de transporte rodoviário do Brasil*. 2006. 208 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- AMÉRICA LATINA LOGÍSTICA – ALL. *Relatório de sustentabilidade*. 2013. Disponível em: <http://ri.rumolog.com/ptb/5259/all_rs2013_pdf_20140710.pdf>. Acesso em: 27 out. 2014.
- ANDERSSON, E. et al. *Rail freight transport – Techno-economic analysis of energy and greenhouse gas reductions: TOSCA – Technology Opportunities and Strategies toward Climate-friendly Transport*. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology – KTH, 2011.
- ARAÚJO, M. P. S.; BANDEIRA, R. A. M.; GOUVEA, V. B. G. Custos e fretes praticados no transporte rodoviário de cargas: uma análise comparativa entre autônomos e empresas. *Journal of Transport Literature*, v. 8, n. 4, p. 187-226, out. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE TRANSPORTE TERRESTRE DE PASSAGEIROS – ABRATI (Brasil). *Informativo ABRATI*. Disponível em: <<http://www.abrati.org.br/>>. Acesso em: 6 jun. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO – ABVE (Brasil). *Por que agora o carro elétrico?* Disponível em: <<http://www.abve.org.br/destaques/2013/destaque13026.asp>>. Acesso em: 14 maio 2014a.

_____. *Roteiro para Difusão de Veículos Elétricos no Brasil – RVE Roadmap*. Disponível em: <http://www.abve.org.br/downloads/road%20map%202013%2030%20setembro%20_%20final.pdf>. Acesso em: 11 mai. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE MOTOCICLETAS, CICLOMOTORES, MOTONETAS, BICICLETAS E SIMILARES – ABRACICLO (Brasil). *Dados do setor*. Disponível em: <<http://www.abraciclo.com.br/dados-do-setor/38-motocicleta/78-producao>>. Acesso em: 27 out. 2014.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS – ANTP (Brasil). *Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da ANTP*. Julho/2014. Disponível em: <http://antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2014/08/01/CB06D67E-03DD-400E-8B86-D64D78AFC553.pdf>. Acesso em: 13 set. 2014.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES – ANFAVEA (Brasil). *Anuário da indústria automobilística brasileira*. Brasília: Anfavea, 2015. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/anuario.html>>. Acesso em: 21 mai. 2015.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES DE PASSAGENIROS SOBRE TRILHOS – ANPTrilhos (Brasil). *Balanco do setor metroferroviário de passageiros 2012/2013*. Brasília: ANPTrilhos, 2013. Disponível em: <<http://www.mobilize.org.br/midias/pesquisas/balanco-do-setor-metroferroviario-20122013.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2014.

_____. *O Transporte de Passageiros sobre Trilhos*. Disponível em: <http://www.anptrilhos.org.br/index.php?option=com_content&view=article&id=973&Itemid=35>. Acesso em: 17 out. 2014.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS – ANTF (Brasil). *As concessionárias do transporte ferroviário de carga*. Brasília: ANFT, 2013. Disponível em: <http://www.desenvolvimento.gov.br/portalmDic/arquivos/dwnl_1375733867.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2014.

ATABANI, A. E. et al. A review on global fuel economy standards, labels and technologies in the transportation sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 9, p. 4586-4610, dez. 2011.

AUSTRÁLIA. Department of Resources, Energy and Tourism – RET. *Fuel for Thought - Identifying potential energy savings in the Australian road and rail sectors*. Sydney, Australia: RET, 2012. Disponível em: <<http://eex.gov.au/files/2012/03/Fuel-for-Thought.pdf>>. Acesso em: 29 set. 2015.

AUSTRÁLIA. Department of Infrastructure and Regional Development. *Freightline I – Australian freight transport overview*: Bureau of Infrastructure, Transport and Regional Economics, 2014.

_____. *Transport*. 2015. Disponível em: <<https://infrastructure.gov.au/transport/>>. Acesso em: 29 set. 2015.

BAJAY, S. V. Modelos de Planejamento da Expansão de Sistemas Energéticos. In: *X Congresso Brasileiro de Energia – CBE*. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/xcbe/>>. Acesso em: 15 ago. 2015.

BAKER, H. et al. *Review of low carbon technologies for heavy goods vehicles*. Califórnia, EUA: Ricardo Inc., 2009. Disponível em: <<http://www.lowcvp.org.uk/assets/reports/090715%20Review%20of%20low%20carbon%20technologies%20for%20heavy%20goods%20vehicles.pdf>>. Acesso em: 31 dez. 2016.

BALLOU, R. H. *Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BANDIVADEKAR, A. et al. *On the road in 2035 – Reducing transportation's petroleum consumption and GHG emissions*. Cambridge, Massachusetts: MIT Laboratory for Energy and The Environment, 2008a.

_____. Reducing the fuel use and greenhouse gas emissions of the US vehicle fleet. *Energy Policy*, v. 36, n. 7, p. 2754-2760, jul. 2008b.

BANISTER, D. *Unsustainable transport: city transport in the new century*. 1st ed. London; New York: Routledge, 2005.

BANISTER, D.; FINCH, E. *Urban transport and the environment*. London, UK: Global Report on Human Settlements, 2013. Disponível em: <http://unhabitat.org/wp-content/uploads/2013/06/GRHS.2013.Case_Study_London.UK_.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2016.

BARCAS. *Linhas, horários e tarifas*. Disponível em: <<http://www.grupoccr.com.br/barcas/linhas-horarios-tarifas>>. Acesso em: 15 ago. 2015.

BARRÉ, A. et al. A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications. *Journal of Power Sources*, v. 241, p. 680-689, nov. 2013.

BARTHOLOMEU, D. B.; CAIXETA FILHO, J. V. Quantification of the environmental impacts of road conditions in Brazil. *Ecological Economics*, v. 68, n. 6, p. 1778-1786, abr. 2009.

BASTIN, C. *Análise da difusão de novas tecnologias automotivas em prol da eficiência energética na frota de novos veículos leves no brasil*, 2010. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/cristina_smith.pdf>. Acesso em: 30 set. 2014.

BIOETHANOL FOR SUSTAINABLE TRANSPORT – BEST. *Report on experiences of ethanol buses and fuel stations in São Paulo*. BioEthanol for sustainable transport. São Paulo, Brasil: BEST, 2009. Disponível em: <http://www.stockholm.se/Global/Frist%C3%A5ende%20webbplatser/Milj%C3%B6f%C3%B6rvaltningen/Milj%C3%B6bilar/Bilder/best/reports/D2.07_Ethanol_Buses_in_SaoPaulo.pdf>. Acesso em: 18 out. 2015.

_____. *Results and recommendations from the European BEST Project*. Estocolmo, Suécia: BEST, 2011. Disponível em: <<http://www.baff.info/rapporteur/BEST%20-%20BioEthanol%20for%20Sustainable%20Transport.pdf>>. Acesso em: 19 nov. 2015

_____. *The BEST experiences with bioethanol buses*. BioEthanol for Sustainable Transport. Estocolmo, Suécia: BEST, 2010. Disponível em: <www.stockholm.se/Global/Frist%C3%A5ende%20webbplatser/Milj%C3%B6f%C3%B6rvaltningen/Milj%C3%B6bilar/Bilder/best/reports/D2.08_The_BEST_experiences_with_bioethanol_buses.pdf>. Acesso em: 23 set. 2015.

BLOOMBERG. *Toyota plans \$50,000 hydrogen fuel-cell sedan by 2015*. Disponível em: <<http://www.bloomberg.com/news/2010-05-06/toyota-targets-50-000-range-for-hydrogen-powered-sedan-planned-by-2015.html>>. Acesso em: 17 maio 2014.

BORETTI, A.; STECKI, J. *Hydraulic hybrid heavy duty vehicles – Challenges and opportunities*. 2012. Disponível em: <<http://papers.sae.org/2012-01-2036/>>. Acesso em: 31 jul. 2015.

BOWERS, B. et al. Onboard fuel processor for PEM fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 32, n. 10-11, p. 1437-1442, jul. 2007.

BRADLEY, T. H.; FRANK, A. A. Design, demonstrations and sustainability impact assessments for plug-in hybrid electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 1, p. 115-128, jan. 2009.

BRASIL. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial – ABDI. *Plano Brasil Maior – Acompanhamento das Medidas Setoriais*. BRASÍLIA: ABDI, 2013a.

_____. *Plano Brasil Maior – Balanço Executivo – 2 anos, 2013b*. Disponível em: <http://www.abdi.com.br/Estudo/PBM%20-%20Balan%C3%A7o_.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2014.

_____. *Relatório de acompanhamento das agendas estratégicas setoriais*. Brasília: ABDI, 2014. Disponível em: <<http://www.brasilmaior.mdic.gov.br/images/data/201501/9e3f3cc3dfbc0b3e7a9db2656cc5d74c.pdf>>. Acesso em: 23 ago. 2015.

BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC. *Anuário do transporte aéreo: Dados estatísticos e econômicos de 2009*. Brasília: ANAC, 2009. Disponível em: <<http://www2.anac.gov.br/estatistica/anuarios.ASP>>. Acesso em: 1 fev. 2015

_____. *Anuário do transporte aéreo: Dados estatísticos e econômicos de 2012*. Brasília: ANAC, 2013a. Disponível em: <<http://www2.anac.gov.br/estatistica/anuarios.ASP>>. Acesso em: 1 fev. 2015.

_____. *Notícias – Agência Nacional de Aviação*. Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/SalaImprensa.aspx>>. Acesso em: 4 jul. 2014a.

_____. *Press kit: Assinatura do Contrato do Aeroporto de Confins (MG)*. Brasília: ANAC, 2014b. Disponível em: <http://www2.anac.gov.br/Arquivos/Release_Confins_V2.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2014.

_____. *Tarifas aéreas domésticas*. Brasília: ANAC, 2013b. Disponível em: <<http://www2.anac.gov.br/estatistica/tarifasaereas/>>. Acesso em: 13 dez. 2013.

BRASIL. Agência Nacional de Transportes Aquaviários – ANTAQ. *Anuário estatístico de transportes aquaviários 2011*. Brasília: Antaq, 2012a. Disponível em: <www.antaq.gov.br/portal/anuarios/anuario2011/body/index.htm>. Acesso em: 1 fev. 2015.

_____. *Anuário estatístico de transportes aquaviários 2012*. Brasília: Antaq, 2013a. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br/Portal/Anuarios/Anuario2012/index.htm>>. Acesso em: 1 fev. 2015.

_____. *Caracterização da oferta e da demanda do transporte fluvial de passageiros na Região Amazônica*. Brasília: Antaq, 2013c. Disponível em: <www.antaq.gov.br/portal/pdf/TransportePassageiros.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2015.

_____. *Cenário da cabotagem brasileira – 2010 a 2012*. Brasília: Antaq, 2013b. Disponível em: <www.antaq.gov.br/Portal/Pdf/PublicacoesTecnicas/EstudoCabotagem.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2015.

_____. *Consulta Agência Nacional de Transportes Aquaviários – Frota geral – Analítica e sintética*. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br/portal/Frota/ConsultarFrotaGeral.aspx>>. Acesso em: 5 maio 2014a.

_____. *Estatísticas da navegação interior*. Brasília: Antaq, 2011a. Disponível em: <www.antaq.gov.br/portal/pdf/EstatisticaNavInterior/EstatisticaInterior2010.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2015.

_____. *Hidrovias brasileiras: Indicadores do transporte de cargas: Tonelada útil transportada (t) e tonelada quilômetro útil (TKU)*. Brasília: Antaq, 2013d. Disponível em: <http://www.antaq.gov.br/portal/pdf/EstatisticaNavInterior/Transporte_de_Cargas_Hidrovias_Brasileiras_2012TKU.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2015.

_____. *Panorama da navegação marítima e de apoio*. Brasília: Antaq, 2012b. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br/portal/pdf/BoletimPortuario/PanoramaNavegacaoMaritimaApoio2012.pdf>>. Acesso em: 1 fev. 2015.

_____. *Perguntas frequentes*. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br/portal/PerguntasFrequentes.asp>>. Acesso em: 1 fev. 2015.

_____. *Transporte de cargas nas hidrovias brasileiras*. Brasília: Antaq, 2011b. Disponível em: <www.antaq.gov.br/portal/pdf/EstatisticaNavInterior/Transporte_Cargas_Hidrovias_Brasileiras_2011.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2015.

BRASIL. Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT. *Acompanhamento das concessões ferroviárias – Relatório anual*. Brasília: ANTT, 2013b. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/4994/Relatorios_Anuais.html>. Acesso em: 14 jul. 2015.

_____. *Análise dos custos unitários de construção e custos operacionais de grandes projetos de infraestrutura de transporte para apoio ao projeto do trem de alta velocidade (TAV)*. Brasília: ANTT, 2009. Disponível em: <www.antt.gov.br/html/objects/_downloadblob.php?cod_blob=3710>. Acesso em: 11 jun. 2015.

_____. *Apresentação* – Portal ANTT. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/4890/Apresentacao.html>>. Acesso em: 30 jun. 2014a.

_____. *Comunicado Relevante nº 012/2013*. Brasília: ANTT, 2013a. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/20289/Comunicados_Relevantes.html>. Acesso em: 11 ago. 2015.

_____. *Evolução do transporte ferroviário 2013/2014*. Brasília: ANTT, 2014d. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/15884/Evolucao_do_Transporte_Ferrovuario.html>. Acesso em: 11 ago. 2015.

_____. *Ferrovário* – Portal ANTT. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/4735/Ferrovuario.html>>. Acesso em: 30 jun. 2014e.

_____. *PROPASS Brasil* – Projeto da Rede Nacional de Transporte Rodoviário Interestadual e Internacional de Passageiros. Disponível em: <<http://propass.antt.gov.br/index.php/content/view/731.html>>. Acesso em: 30 jun. 2014b.

_____. *Registro Nacional de Transporte Rodoviário de Cargas* – RNTRC. Disponível em: <http://app-web2.antt.gov.br/rntrc_numeros/rntrc_TransportadorFrotaTipoVeiculo.asp>. Acesso em: 19 abr. 2014c.

_____. *Trem de alta velocidade*. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/5448/Trem_de_Alta_Velocidade___TAV.html>. Acesso em: 14 jul. 2014h.

_____. *Trens regionais de passageiros no Brasil*. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/4927/Trens_Regionais.html>. Acesso em: 15 jul. 2014f.

_____. *Trens de passageiros* – Uma necessidade que se impõe. Brasília: Agência Nacional de Transportes Terrestres, 2014g. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/html/objects/_downloadblob.php?cod_blob=12544>. Acesso em: 21 jan. 2015.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP. Resolução ANP nº 52, de 29.12.2010. *DOU* 30.12.2010.

_____. *Relatórios de atividade econômica* – Planilhas de vendas por estado da Federação. Rio de Janeiro: ANP, 2013.

_____. *Dados estatísticos mensais*. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?id=548>>. Acesso em: 15 out. 2014.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama. Resolução Conama nº 18/1986, 1986. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res1886.html>>. Acesso em: 30 set. 2014.

BRASIL. Decreto nº 7.819, de 3 de outubro de 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/Decreto/D7819.htm>. Acesso em: 10 jan. 2014.

_____. *Decreto nº 8.015*, de 17 de maio de 2013. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/Decreto/D8015.htm>. Acesso em: 10 jan. 2014.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – Dnit. *Manual de projeto e práticas operacionais para segurança nas rodovias*. Brasília: Dnit, 2010. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/publicacoes/741_Manual_Projeto_Praticas_Operacionais.pdf>. Acesso em: 13 out. 2014.

_____. *Rede rodoviária do PNV*. Brasília: Dnit, 2013. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/sistema-nacional-de-viacao/snv-2013>>. Acesso em: 13 out. 2014.

BRASIL. Departamento Nacional de Trânsito – Denatran. *Frota de veículos*. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/frota2014.htm>>. Acesso em: 30 jun. 2014.

BRASIL. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária – Infraero. *Boletim logístico 2013*: Caderno de movimentação. Brasília: Infraero, 2013. Disponível em: <<http://www.infraero.gov.br/index.php/br/movimentacao-das-cargas/boletins-estatisticos.html>>. Acesso em: 27 jan. 2015.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. *Análise da inserção da geração solar na matriz elétrica brasileira*. Rio de Janeiro: EPE, 2012b. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/geracao/documents/estudos_23/nt_energiasolar_2012.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2015.

_____. *Avaliação do comportamento dos usuários de veículos flex fuel no consumo de combustíveis no Brasil*. Rio de Janeiro: EPE, 2013. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/petroleo/documents/dpg_docs/epe-dpg-sdb-001-2013-r0.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2015.

_____. *Balanco energético nacional*. Rio de Janeiro: EPE, 2014a. Disponível em: <<http://ben.epe.gov.br/>>. Acesso em: 31 jan. 2015.

_____. *Demanda de Energia – 2050*: Plano Nacional de Energia 2050. Rio de Janeiro: EPE, 2014b. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/DEA%202013-14%20Demanda%20de%20Energia%202050.pdf>>. Acesso em: 27 jan. 2016.

_____. *Estudo associado ao Plano Decenal de Energia PDE 2021 – Consolidação de bases de dados do setor transporte: 1970-2010*. Rio de Janeiro: EPE, 2012a. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Petroleo/Documents/Estudos_28>. Acesso em: 11 maio. 2014.

BRASIL. Empresa de Planejamento e Logística S.A. – EPL. *Logística Brasil*. Disponível em: <<http://www.logisticabrasil.gov.br/>>. Acesso em: 4 jul. 2014a.

_____. *Programa de Investimentos em Logística – Concessões ferroviárias*. Disponível em: <<http://www.logisticabrasil.gov.br/ferrovias2>>. Acesso em: 27 jul. 2014b.

_____. *TAV – Estudo de viabilidade: conceitos e vantagens*. Disponível em: <<http://www.epl.gov.br/conceitos-e-vantagens>>. Acesso em: 27 jul. 2014c.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. *Microdados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios*. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/trabalhoerendimento/pnad2011/microdados.shtm>>. Acesso em: 19 dez. 2013.

_____. *Produto Interno Bruto – Variação em Volume*. Disponível em: <<http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?no=11&op=2&vcodigo=SCN53&t=produto-interno-brutobrvvariacao-volume>>. Acesso em: 27 out. 2014.

_____. *Projeção da população do Brasil entre 2000 e 2060 e projeção da população das Unidades da Federação entre 2000 e 2030*. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/projecao_da_populacao/2013/default_tab.shtm>. Acesso em: 1 fev. 2015.

BRASIL. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada; Associação Nacional dos Transportes Públicos – Ipea/ANTP. *Redução das deseconomias urbanas com a melhoria do transporte público*. Brasília: IPEA/ANTP, 1999. Disponível em: <http://www.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2013/01/10/057A84C9-76D1-4BEC-9837-7E0B0AEAF5CE.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2014.

BRASIL. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Ipea. *Elasticidade-renda e elasticidade-preço da demanda de automóveis no Brasil: Textos para discussão*. Brasília: Ipea, 1998. Disponível em: <http://www.en.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td_0558.pdf>. Acesso em: 27 out. 2014.

_____. *Panorama e perspectivas para o transporte aéreo no Brasil e no mundo*. Brasília: Ipea, 2010. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/100531_comunicadodoipea_54.pdf>. Acesso em: 31 nov. 2014.

_____. *Tempo de deslocamento casa-trabalho no Brasil (1992-2009): diferenças entre regiões metropolitanas, níveis de renda e sexo*. Brasília: Ipea, 2013. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/958/1/TD_1813.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2014.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – Inmetro. *Programa Brasileiro de Etiquetagem*. Disponível em: <<http://pbeveicular.petrobras.com.br/TabelaConsumo.aspx>>. Acesso em: 29 dez. 2013.

_____. *Como você decide a compra de seu carro?* 2014b. Disponível em: <http://pbeveicular.petrobras.com.br/Arquivos/Guia_PBE_Veicular_INMETRO.pdf>. Acesso em: 30 set. 2014.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – MCTIC. *Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Brasília: MCTI, 2010. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0213/213909.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2015.

_____. *Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Brasília: MCTIC, 2016. Disponível em: <<http://sirene.mcti.gov.br/publicacoes>>. Acesso em: 15 jul. 2016.

_____. *Inovar-Auto 2013-2017*, 2012. Disponível em: <www.desenvolvimento.gov.br/arquivos/dwnl_1349358208.ppt>. Acesso em: 10 jan. 2014.

BRASIL. Ministério da Fazenda – MF. *Tabela de Incidência do Imposto sobre Produtos Industrializados (TIPI)*. Brasília: Ministério da Fazenda. Receita Federal do Brasil, 2012. Disponível em: <<http://www.receita.fazenda.gov.br/publico/tipi/TIPI.doc>>. Acesso em: 23 ago. 2015.

BRASIL. Ministério das Cidades – MCidades. *Manual de BRT – Guia de Planejamento*. Brasília: MCidades, 2008. Disponível em: <http://www.sedhab.df.gov.br/mapas_sicad/conferencias/manual_de_brt.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2015.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia – MME. *Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel*. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/programas/biodiesel/menu/biodiesel/pnpb.html>>. Acesso em: 14 fev. 2015.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – MMA. *1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas do Transporte Ferroviário de Cargas*. Brasília: MMA, 2012. Disponível em: <http://www.cntdespoluir.org.br/Documents/PDFs/invent%C3%A1rio%20ferrovi%C3%A1rio%202012_final.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2014.

_____. *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2014. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=71044&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1402513929715>>. Acesso em: 2 jan. 2015.

BRASIL. Ministério do Planejamento – MP. *10º Balanço Completo do PAC (Janeiro-Abril 2010)*. Brasília: MP, 2012. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/sobre-o-pac/publicacoesnacionais>>. Acesso em: 15 mai. 2015.

_____. *10º Balanço do PAC 2*. Brasília: MP, 2012. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/sobre-o-pac/divulgacao-do-balanco>>. Acesso em: 4 jul. 2014. Acesso em: 15 mai. 2015.

_____. *1º Balanço Completo do PAC (Janeiro-Abril 2007)*. Brasília: MP, 2009. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/sobre-o-pac/publicacoesnacionais>>. Acesso em: 15 mai. 2015.

_____. *1º Balanço Completo do PAC 2 (Janeiro-Junho 2011)*. Brasília: MP, 2013. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/sobre-o-pac/publicacoesnacionais>>. Acesso em: 15 mai. 2015.

_____. *4º Balanço Completo do PAC (Janeiro-Abril 2008)*. Brasília: MP, 2010. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/sobre-o-pac/publicacoesnacionais>>. Acesso em: 15 mai. 2015.

_____. *4º Balanço Completo do PAC 2 (Janeiro-Abril 2012)*. Brasília: MP, 2014a. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/sobre-o-pac/publicacoesnacionais>>. Acesso em: 15 mai. 2015.

_____. *7º Balanço Completo do PAC (Janeiro-Abril 2009)*. Brasília: MP, 2011. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/sobre-o-pac/publicacoesnacionais>>. Acesso em: 15 mai. 2015.

_____. 7º *Balanço Completo do PAC 2* (Janeiro-Abril 2013). Brasília: MP, 2014b. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/sobre-o-pac/publicacoesnacionais>>. Acesso em: 15 mai. 2015.

_____. *Obras do PAC – Programa de Aceleração do Crescimento*. Brasília: MP, 2015a. Disponível em: <<http://dados.gov.br/dataset/obras-do-pac-programa-de-aceleracao-do-crescimento>>. Acesso em: 15 mai. 2016.

_____. *Programa de Aceleração do Crescimento – Eixos*. Brasília: MP, 2015b. Disponível em: <<http://www.planejamento.gov.br/assuntos/investimento-e-pac/eixos>>. Acesso em: 15 mai. 2016.

BRASIL. Ministério dos Transportes – MT. *Diretrizes da Política Nacional de Transporte Hidroviário*. Brasília: MT, 2010. Disponível em: <[HTTP://www2.transportes.gov.br/Modal/Hidroviario/PNHidroviario.pdf](http://www2.transportes.gov.br/Modal/Hidroviario/PNHidroviario.pdf)>. Acesso em: 13 dez. 2012.

_____. *Glossário*. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/glossario>>. Acesso em: 11 maio. 2014.

_____. *Plano Hidroviário Estratégico*. Brasília: MT, 2013b. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/public/arquivo/arq1381776889.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2015.

_____. *Plano Hidroviário Estratégico – Sumário executivo 2013*. Brasília: MT, 2013c. Disponível em: <http://www.transportes.gov.br/images/TRANSPORTE_HIDROVIARIO/PHE/SUMARIO_EXECUTIVO.pdf>. Acesso em: 16 set. 2015.

_____. *Plano Setorial de Transporte e de Mobilidade Urbana para Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima (PSTM)*. Brasília: MT, 2013a. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/public/arquivo/arq1372705471.pdf>>. Acesso em: 19 ago. 2014.

_____. *Transporte hidroviário: Desafios e soluções*. Brasília: MT, 2012. Disponível em: <http://www.al.rs.gov.br/Download/CSP/Ad%C3%A3o%20Proen%C3%A7a_MT_%2026_11.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2015.

BRASIL. Petrobras. *Combustíveis marítimos – Informações técnicas*. Rio de Janeiro: Petrobras, 2013. Disponível em: <<http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciatecnica/>>. Acesso em: 20 abr. 2013.

BRASIL. Receita Federal. *Direito ao crédito presumido do IPI*. Disponível em: <<http://www.receita.fazenda.gov.br/PessoaJuridica/IPI/dcp/Orientacoes/direito.htm>>. Acesso em: 10 jan. 2014.

BRASIL. Secretaria de Política Nacional de Transportes – SPNT. *Projeto de Reavaliação de Estimativas e Metas do PNLT*. Brasília: SPNT, 2012. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/conteudo/69407>>. Acesso em: 17 set. 2014.

BRASIL. Secretaria de Portos da Presidência da República – SEP/PR. *Plano Nacional de Logística Portuária – Planos Mestres – Sumário Executivo*. Brasília: SEP/PR, 2012. Disponível em: <<http://www.portosdobrasil.gov.br/assuntos-1/pnpl/planos-mestres-sumarios-executivos>>. Acesso em: 13 nov. 2013.

_____. *Planejamento Portuário Nacional*. Brasília: SEP/PR, 2015. Disponível em: <<http://www.portosdobrasil.gov.br/assuntos-1/pnpl>>. Acesso em: 19 out. 2015.

BRASIL. Secretaria Nacional de Transporte e da Mobilidade Urbana – Semob. *PlanMob* – Caderno de referência para elaboração de plano de mobilidade urbana. Brasília: Semob, 2015. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSE/planmob.pdf>>. Acesso em: 1 dez. 2015.

BURKE, A.; MILLER, M. The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications. *Journal of Power Sources*, v. 196, n. 1, p. 514-522, jan. 2011.

BUSHELL, M. A. et al. *Costs for pedestrian and bicyclist infrastructure improvements*. North Carolina, US: UNC Highway Safety Research Center, 2013. Disponível em: <http://katana.hsrc.unc.edu/cms/downloads/Countermeasure%20Costs_Report_Nov2013.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2014.

BYD. *Electric Bus*. Disponível em: <<http://www.byd.com/na/auto/ElectricBus.html>>. Acesso em: 4 jul. 2014.

CANADA. National Research Council – NRC. *Assessment of fuel economy technologies for light-duty vehicles*. Washington DC, USA: The National Academies Press, 2011.

_____. *Technologies and approaches to reducing the fuel consumption of medium- and heavy-duty vehicles*. Washington DC, USA: The National Academies Press, 2010.

CAPASSO, C.; VENERI, O. Experimental analysis on the performance of lithium based batteries for road full electric and hybrid vehicles. *Applied Energy*, v. 136, n. 1, p. 921-930, abr. 2014.

CHAVES, E. A. et al. *Transporte hidroviário de cargas: uma proposta para a Baixada Santista*. Santos: Universidade Santa Cecília, 2014. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/1371999-Transporte-hidroviario-de-cargas-uma-proposta-para-a-baixada-santista.html>>. Acesso em: 7 jan. 2015.

CHÉRON, C. et al. *European railway energy roadmap: towards 2030*. Paris, France: SNCF Innovation and Research Department, 2011. Disponível em: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/a2_cheron_christophe.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2015.

CIRCULA SEGURO. *A questão do “cone de aspiração”*. Disponível em: <<http://www.circulaseguro.pt/seguranca-activa/questao-do-cone-aspiracao>>. Acesso em: 19 jul. 2014.

CITROEN. *Decubra o C-Zero*. Disponível em: <<http://www.citroen.pt/citroen-c-zero/#/citroen-c-zero/>>. Acesso em: 31 maio 2014.

CITY FIX. *A tale of two bus systems in Bogotá*. Disponível em: <<http://thecityfix.com/blog/photo-essay-a-tale-of-two-bus-systems-in-bogota/>>. Acesso em: 15 jul. 2015.

CN. *The Maglev Experience*. Disponível em: <<http://www.canv-maglev.com/>>. Acesso em: 4 ago. 2014.

COENSEL, B. D.; BOTTELDOOREN, D. *Traffic signal coordination: a measure to reduce the environmental impact of urban road traffic?* Ghent, Belgium: Department of Information Technology, Ghent University, 2011. Disponível em: <<https://biblio.ugent.be/input/download?func=downloadFile&recordId=2043373&fileId=2043378>>. Acesso em: 13 mai. 2013.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT (Brasil). *O sistema ferroviário brasileiro: Transporte e economia*. Brasília: CNT, 2013b. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/paginas/Transporte-e-Economia.aspx>>. Acesso em: 15 jul. 2015.

_____. *Pesquisa CNT de ferrovias*. Brasília: CNT, 2011. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Paginas/Pesquisas_Detalhes.aspx?p=7>. Acesso em: 15 jul. 2015.

_____. *Pesquisa CNT do transporte aquaviário – Navegação interior*. Brasília: CNT, 2013a. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Paginas/Pesquisas_Detalhes.aspx?p=4>. Acesso em: 15 jul. 2015.

_____. *Pesquisa CNT do transporte aquaviário – Cabotagem*. Brasília: CNT, 2013d. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Paginas/Pesquisas_Detalhes.aspx?p=9>. Acesso em: 15 jul. 2015.

_____. *Pesquisa CNT de rodovias*. Brasília: CNT, 2014. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/index.aspx>>. Acesso em: 15 jul. 2015.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE; SERVIÇO SOCIAL DO TRANSPORTE; SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM DO TRANSPORTE – CNT/Sest/Senar (Brasil). *Relatório síntese de informações ambientais*. Brasília: CNT/Sest/Senar, 2011. Disponível em: <http://www.cntdespoluir.org.br/Documents/PDFs/Relatorio_Sintese_de_Informacoes_Ambientais.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2015.

CONVIVA. *450 km de ciclovias no RJ até 2016*. Disponível em: <<http://www.movimentoconviva.com.br/site/450-km-de-ciclovias-no-rj-ate-2016/>>. Acesso em: 17 out. 2015.

CORREIA, E. L. Efeitos técnico-econômicos sobre a demanda de carburantes no Brasil. In: *VII Congresso Brasileiro de Energia – CBE. Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia*. Rio de Janeiro, 1996.

COSTA, R. C. DA. Do model structures affect findings? Two energy consumption and CO₂ emission scenarios for Brazil in 2010. *Energy Policy*, v. 29, n. 10, p. 777-785, ago. 2001.

CRUVINEL, R. R. S.; PINTO, P. V. H.; GRANEMANN, S. R. Mensuração econômica da emissão de CO₂ da frota dos transportadores autônomos de cargas brasileiros. *Journal of Transport Literature*, v. 6, n. 2, p. 234-252, abr. 2012.

CULTURA E VIAGEM. *Trafalgar Square, de Londres*. Disponível em: <<https://culturaeviagem.wordpress.com/2013/02/13/top-10-pracas-do-mundo-x-trafalgar-square-de-londres/>>. Acesso em: 27 nov. 2015.

DAISHO, Y. et al. Final Report of Joint Meeting between the Automobile Evaluation Standards Subcommittee, Energy Efficiency Standards Subcommittee of the Advisory Committee for Natural Resources and Energy and the Automobile Fuel Efficiency Standards Subcommittee, Automobile Section, Land Transport Division of the Council for Transport Policy, 2011. Disponível em: <http://www.eccj.or.jp/top_runner/pdf/tr_passenger_vehicles_dec2011.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2015.

DARGAY, J.; GATELY, D.; SOMMER, M. Vehicle Ownership and Income Growth, Worldwide: 1960-2030. *The Energy Journal*, v. 28, n. 4, 2007.

DELUCCHI, M. A.; LIPMAN, T. E. Lifetime Cost of Battery, Fuel-Cell, and Plug-in Hybrid Electric Vehicles. In: *Electric and hybrid vehicles: Power sources, models, sustainability, infrastructure and the Market*. Oxford, UK: Elsevier, 2010, p. 19-60.

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT – GIZ. *Urban Transport Institutions*. 2004. Disponível em: <http://www.sutp.org/files/contents/documents/resources/A_Sourcebook/SB1_Institutional-and-Policy-Orientation/GIZ_SUTP_SB1b_Urban-Transport-Institutions_EN.pdf>. Acesso em: 19 mai. 2015.

_____. *Transportation demand management*. 2009. Disponível em: <http://www.sutp.org/files/contents/documents/resources/H_Training-Material/GIZ_SUTP_TM_Transportation-Demand-Management_EN.pdf>. Acesso em: 15 set. 2015.

_____. *Eco-mobilidade para o Brasil: Uma construção conjunta*. 2011. Disponível em: <<https://nitbikers.files.wordpress.com/2012/01/eco-mobility-brasil.pdf>>. Acesso em:

_____. *Planos de mobilidade urbana: Abordagens nacionais e práticas locais*. 2014. Disponível em: <http://www.sutp.org/files/contents/documents/resources/B_Technical-Documents/GIZ_SUTP_TD13_Urban-Mobility-Plans_PT.pdf>. Acesso em: 15 set. 2015.

DHAMEJA, S. Electric vehicle batteries. In: *Electric vehicle battery systems*. [s.l.] Elsevier, 2002a. p. 1-21.

_____. Electric vehicle battery capacity. In: *Electric vehicle battery systems*. [s.l.] Elsevier, 2002b. p. 43-68.

DULEEP, K. G. Heavy duty trucks fuel economy technology. In: MICHELIN BIBENDUM. Berlin, Germany, 2011. Disponível em: <<http://www.iea.org/workshop/work/hdv/duleep.pdf>>. Acesso em: 13 mai. 2013.

DUTRA, N. G. S. *O enfoque de “city logistics” na distribuição urbana de encomendas*. 2004. 212 f. Tese (Doutorado em Engenharia da Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2004.

EASTHAM, J. et al. Comparison of short primary linear machines for high speed maglev vehicles. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 23, n. 5, p. 2338-2343, set. 1987.

EGÚSQUIZA, J. C. C. *Avaliação experimental de um motor do ciclo diesel operando no modo bicomcombustível: Diesel/Etanol e Diesel/Gás*. 2011. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2011.

_____. *Redução das emissões em motores diesel-gás*. 2006. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2006.

ELECTROCELL. *Como funciona a célula combustível?* Disponível em: <http://www.electrocell.com.br/oqueeacc_pt.htm>. Acesso em: 15 dez. 2014.

ELONDRES. *Transporte público de Londres*. Disponível em: <<https://www.elondres.com/transporte-publico-de-londres/>>. Acesso em: 15 out. 2015.

ERHARD, M.; STRAUCH, H. Control of Towing Kites for Seagoing Vessels. *IEEE Control Systems Society*, v. 21, n. 5, p. 1629-1640, set. 2013.

EUDY, L.; CHANDLER, K.; GIKAKIS, C. *Fuel cell buses in U.S. transit fleets: Current status 2012*. Colorado, US: National Renewable Energy Laboratory, 2012. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56406.pdf>>. Acesso em: 19 nov. 2014.

EURAIL. *High-speed trains*. Disponível em: <<http://www.eurail.com/trains-europe/high-speed-trains>>. Acesso em:

EUROPEAN COMMISSION. *Climate action: Questions and answers on the proposals to reduce CO₂ emissions from cars and vans further by 2020*. 2012. Disponível em: <http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-12-548_en.htm>. Acesso em: 17 jan. 2014.

_____. *Reducing CO₂ emissions from passenger cars*. 2014. Disponível em: <http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/index_en.htm>. Acesso em: 17 jan. 2014.

_____. *Transport*. 2015. Disponível em: <http://ec.europa.eu/transport/index_en.htm>. Acesso em: 2 abr. 2015.

FABER, J. et al. *Lower NOx at higher altitudes: Policies to reduce the climate impact of aviation NOx emission*. 2008. Disponível em: <http://ec.europa.eu/transport/modes/air/studies/doc/environment/oct_2008_nox_final_report.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2015.

_____. *Reduction of GHG emissions from ships*. Londres, Inglaterra: International Maritime Organization, jul. 2010. Disponível em: <www.cedelft.eu/?go=home.downloadPub&id=1090&file=7225_rapport.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2015.

FALCUCCI, G. et al. Integrated numerical and experimental study of a MCFC-plasma gasifier energy system. *Applied Energy*, v. 97, p. 734-742, set. 2012.

FAUTH, K.; MORAIS, I.; CLEZAR, R. O mercado de automóveis, ônibus e caminhões no Brasil, 1996-2008. In: XXXVII Encontro Nacional de Economia. Foz do Iguaçu, 2009. Disponível em: <<http://www.anpec.org.br/encontro2009/inscricao.on/arquivos/000-8d8a1c7eb496ce1680ca428558c0b429.doc>>. Acesso em: 28 out. 2014.

FAZELPOUR, F. et al. Considerable parameters of using PV cells for solar-powered aircrafts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 22, p. 81-91, jun. 2013.

FEDERAL CHAMBER OF AUTOMOTIVE INDUSTRIES (Australia). *Light vehicle CO₂ emission standards for Australia*, 2011. Disponível em: <http://www.fcai.com.au/library/publication/submission_co2_discussion_paper_final.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2015.

FERRARI FILHO, F. *Análise de um motor do ciclo diesel operando no modo bicomcombustível: diesel/etanol*. 2011. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2011.

FERREIRA, M. P.; CANTARINO, A. Transporte de passageiros no Brasil: análise e comentários de um estudo de caso à luz da responsabilidade social corporativa. *Estudos Tecnológicos em Engenharia*, v. 2, n. 2, p. 113-130, 2006.

FETCENKO, M. A. et al. Recent advances in NiMH battery technology. *Journal of Power Sources*, v. 165, n. 2, p. 544-551, mar. 2007.

FIGUEROA, M. J.; RIBEIRO, S. K. Energy for road passenger transport and sustainable development: assessing policies and goals interactions. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 5, n. 2, p. 152-162, 2013.

FISCHER, M.; WERBER, M.; SCHWARTZ, P. V. Batteries: Higher energy density than gasoline? *Energy Policy*, v. 37, n. 7, p. 2639-2641, jul. 2009.

FREITAS, L. C.; KANEKO, S. Ethanol demand under the flex-fuel technology regime in Brazil. *Energy Economics*, v. 33, n. 6, p. 1146-1154, 2011.

FRITZ, F. Application of an Automated Kite System for Ship Propulsion and Power Generation. In: AHRENS, U.; DIEHL, M.; SCHMEHL, R. (Eds.). *Airborne Wind Energy*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p. 359-372, 2013.

FUEL CELLS BULLETIN. First Hyundai ix35 FCEV rolls off assembly line in Korea. *Fuel Cells Bulletin*, v. 2013, n. 3, p. 2, mar. 2013.

FUEL CELLS. *Fuel Cell Vehicles Fuel Cells 2000*, 2012. Disponível em: <<http://hfcarchive.org/fuelcells/pdfs/techupdatemar03.pdf>>. Acesso em: 13 mai. 2013.

FUNDAÇÃO INSTITUTO DE PESQUISAS ECONÔMICAS – Fipe. *Preço médio de veículos – Tabela Fipe*. Disponível em: <<http://www2.fipe.org.br/pt-br/indices/veiculos/>>. Acesso em: 15 fev. 2015.

GALLO, W. L. R. Ethanol use in heavy – duty engines: alternatives and technical problems to solve. In: *International Workshop on Ethanol Combustion Engines*. São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.fapesp.br/eventos/2012/10/ethanol/Gallo.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2015.

GAO, X.-Z. et al. Reviews of methods to extract and store energy for solar-powered aircraft. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 44, p. 96-108, abr. 2015.

GERSSSEN-GONDELACH, S. J.; FAAIJ, A. P. C. Performance of batteries for electric vehicles on short and longer term. *Journal of Power Sources*, v. 212, p. 111-129, ago. 2012.

GOLDEMBERG, J. et al. Ethanol learning curve – the Brazilian experience. *Biomass and Bioenergy*, v. 26, n. 3, p. 301-304, mar. 2004.

GOODWIN, P.; DENDER, K. V. Peak Car – Themes and issues. *Transport Reviews*, v. 33, n. 3, p. 243-254, 2013.

GOODYEAR. *Radial truck tire and retread service manual*. 2004. Disponível em: <http://www.goodyeartrucktires.com/pdf/resources/service-manual/Retread_All_V.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2014.

GOUVELLO, C. DE. *Estudo de baixo carbono para o Brasil*. Brasília: Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento, 2010. Disponível em: <http://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/Relatorio_Principal_integra_Portugues.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2014.

GREENE, D. L. Fiscal incentives for GHG mitigation: Feebates. In: *CLIMATE CHANGE MITIGATION: THE IMPORTANCE OF PASSENGER VEHICLE EFFICIENCY*. Cidade do México, 8 mar. 2010b. Disponível em: <http://www.unep.org/transport/gfei/autotool/approaches/economic_instruments/Greene_ORNL_Feebates.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2015.

_____. *How consumers value fuel economy: A literature review*. Washington DC, USA: United States Environmental Protection Agency, 2010a. Disponível em: <<http://www.epa.gov/otaq/climate/regulations/420r10008.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2015.

GREENE, D. L.; PLOTKIN, S. E. *Reducing greenhouse gas emissions from U.S. transportation*. Virginia, US: Pew Center on Global Climate Change, 2011. Disponível em: <<http://www.c2es.org/docUploads/reducing-transportation-ghg.pdf>>. Acesso em: 19 jul. 2015.

GUCWA, M.; SCHÄFER, A. The impact of scale on energy intensity in freight transportation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 23, p. 41-49, ago. 2013.

HADDAD, E. *Projeções de crescimento da economia brasileira*. Projeto Opções de Emissões de GEE em Setores-Chave do Brasil. Brasília: MCTI, 2015.

HALCROW/SINERGIA. *TAV Brasil: Vol. 1 – Estimativas de demanda e receita*. Brasília: Consórcio Halcrow/Sinergia, 2009. Disponível em: <http://www.firjan.org.br/site/anexos/Decisaorio/2011-2013/TAV-Relatorio_Final.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2011.

HALSNÆS, K. *Economics of greenhouse gas limitations: main reports: methodological guidelines*. Risø [Denmark]: UNEP Collaborating Centre on Energy and Environment, Risø National Laboratory, Denmark, 1998.

HANSEN, H.; PEREN, D.; NOJIRI, T. Model and full scale evaluation of a "Propeller Boss Cap Fins" – Device Fitted to an Aframax Tanker. In: *Second International Symposium on Marine Propulsors*. Hamburgo, Alemanha: jun. 2011. Disponível em: <http://www.marinepropulsors.com/smp/files/downloads/smp11/Paper/TA2-1_Hansen.pdf>. Acesso em: 23 out. 2014.

HICKS, M. *Enforcement programs for footprint calculations and credit tracking and allocation*, 2010. Disponível em: <<http://www.sae.org/events/gim/presentations/2010/mauricehicks.pdf>>. Acesso em: 11 jan. 2015.

HIRA, A.; DE OLIVEIRA, L. G. No substitute for oil? How Brazil developed its ethanol industry. *Energy Policy*, v. 37, n. 6, p. 2450-2456, jun. 2009.

HOFFBORN, M. *A historical survey of solar powered airplanes and evaluation of its potential market*. Bachelor Thesis – Sweden: Mälardén University, 20 ago. 2009.

HOLLANDA, J. B. Força de arrasto e eficiência energética. In: *Seminário Resistência do Ar e Eficiência Veicular*. INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética, 8 nov. 2011. Disponível em: <http://www.inee.org.br/downloads/eficiencia/Arrasto_2011_JaymeHollandaINEE.ppt>. Acesso em: 15 out. 2014.

HOLMBERG, K.; ANDERSSON, P.; ERDEMIR, A. Global energy consumption due to friction in passenger cars. *Tribology International*, v. 47, p. 221-234, mar. 2012.

HONDA EV. *Honda EV Plus Fact Sheet*. Disponível em: <<http://www.hondaev.org/acarl.html>>. Acesso em: 31 maio 2014.

HU, M.; CAO, G. Research on the long-term stability of a PEMFC stack: Analysis of pinhole evolution. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 39, n. 15, p. 7940-7954, maio 2014.

HULL, J. R.; MURAKAMI, M. Applications of bulk high-temperature Superconductors. *Proceedings of the IEEE*, v. 92, n. 10, p. 1705-1718, out. 2004.

HYUNG-WOO LEE; KI-CHAN KIM; JU LEE. Review of maglev train technologies. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 42, n. 7, p. 1917-1925, jul. 2006.

ICARROS. *Hyundai atualiza o Tucson, o nosso ix35, nos EUA* – Revista iCarros. Disponível em: <<http://www.icarros.com.br/noticias/geral/hyundai-atualiza-o-tucson,-o-nosso-ix35,-nos-eua/15179.html>>. Acesso em: 16 jul. 2014.

ICF INTERNATIONAL. *Comparative evaluation of rail and truck fuel efficiency on competitive corridors*: Federal Railroad Administration. Fairfax, VA: ICF International, 2009. Disponível em: <http://www.ontrackamerica.org/files/Comparative_Evaluation_Rail_Truck_Fuel_Efficiency.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2013.

IGUCHI, M. *Japan's fuel efficiency regulations and the car industry: a study from policy-network approach*, 2008. Disponível em: <<http://www.glogov.org/images/doc/IGUCHI.pdf>>. Acesso em: 17 jan. 2014.

INSTITUTE FOR FUTURES STUDIES AND TECHNOLOGY ASSESSMENT – IZT. *Evaluation of energy efficiency technologies for rolling stock and train operation railways*. Berlin, Germany: IZT, 2003. Disponível em: <http://www.uic.org/download.php/environnement/energy_EVENT.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2011.

INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA – Coppe. *Coppe lança ônibus a hidrogênio com tecnologia nacional*. Disponível em: <<http://www.planeta.coppe.ufrj.br/artigo.php?artigo=1201>>. Acesso em: 24 maio 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS – IBP. *Radiografia do setor: Mercado de GNV – Posição atual – Estatísticas – setembro 2014*. Rio de Janeiro: IBP, 2014. Disponível em: <<http://www.ibp.org.br/services/DocumentManagement/FileDownload.EZTSvc.asp?DocumentID={74CC6F78-8062-4778-941F-1AACB99FECF4}&ServiceInstUID={008234CC-5DAA-4DB6-8D-68-111B3FD798D3}>>. Acesso em: 22 ago. 2015.

INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA – IPPUC. *Plano de Mobilidade Urbana e Transporte Integrado – PlanMob Curitiba*. Curitiba: IPPUC, 2008. Disponível em: <<http://redpgv.coppe.ufrj.br/index.php/es/informacion/banco-de-estudo-de-impactos/641-plano-de-mobilidade-curitiba/file>>. Acesso em: 29 ago. 2015.

INSTITUTO DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM ADMINISTRAÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO; CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – Coppead/CNT. *Transporte de cargas no Brasil – Ameaças e oportunidades para o desenvolvimento do país: diagnóstico e plano de ação*. [s.l.] Coppead/CNT/Sest/Senat, 2002.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Chapter 5 - Transportation and Its Infrastructure. In: *Climate Change 2007 - Mitigation for Climate Change*. 4th Assessment Report ed. Cambridge and New York: IPCC, Working Group III. Cambridge University Press, 2007, p. 93.

_____. Chapter 8 – Transport. In: *Climate Change 2014 – Mitigation for Climate Change*. 5th Assessment Report ed. Cambridge and New York: IPCC, Working Group III. Cambridge University Press, 2014, p. 117.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION – ICAO. *Environmental Report 2010*. [s.l.] International Civil Aviation Organization, 2010.

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION – ICCT. *A review and comparative analysis of fiscal policies associated with new passenger vehicle CO₂ emissions*. Washington: ICCT, 2011a. Disponível em: <http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_fiscalpolicies_feb2011.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2015.

_____. *Best practices for feebate program design and implementation*: Feebate review and assessment. [s.l.] ICCT, 2010. Disponível em: <http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_feebates_may2010.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2015.

_____. *Conversion tool*. [s.l.] ICCT, 2014a. Disponível em: <http://www.theicct.org/sites/default/files/info-tools/pvstds/icon_xls.png>. Acesso em: 22 ago. 2015.

_____. *Global comparison of passenger car and light-commercial vehicle fuel economy/GHG emissions standards*. [s.l.] ICCT, 2014b. Disponível em: <http://www.theicct.org/sites/default/files/info-tools/ICCT_PV_standard_Feb2014.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2015.

_____. *Reducing greenhouse gas emissions from ships*. Washington DC, USA: ICCT, jul. 2011b. Disponível em: <http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_GHGfromships_jun2011.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2014.

_____. *Reducing heavy-duty long-haul combination truck fuel consumption and CO₂ emissions*. Washington DC, USA: ICCT, 2009. Disponível em: <<http://www.theicct.org/reducing-heavy-duty-long-haul-combination-truck-fuel-consumption-and-co2-emissions>>. Acesso em: 13 nov. 2014.

_____. *Trailer technologies for increased HDV efficiency*. Washington DC, USA: ICCT, 2013. Disponível em: <http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_HDVtrailertechs_20130702.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2014.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. *50 big ideas – Shaping the future of electric mobility*. Paris, França: IEA, 2014. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/transport/subtopics/electric-vehiclesinitiative/EVI_2014_Casebook.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2015.

_____. *A tale of renewed cities*. Paris, France: IEA, 2013c. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/renewed_cities_web.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2015.

_____. *Energy technology perspectives 2012*. Paris, France: IEA, 2012a. Disponível em: <<http://www.iea.org/etp/etp2012/>>. Acesso em: 21 abr. 2015.

_____. *Energy technology perspectives 2015*. Paris, França: IEA, 2015. Disponível em: ??? Acesso em: 21 abr. 2015.

_____. *Fuel efficient road vehicle non-engine components - Potencial savings and policy recommendations*. Paris, France: IEA, 2007. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Fuel_Effi_Road_Info-1.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2015.

_____. *Global EV outlook: Understanding the electric vehicle landscape to 2020*. Paris, France: IEA, 2013b. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/globalevoutlook_2013.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2015.

_____. *Improving the fuel economy of road vehicles: A policy package*. Paris, France: IEA 2012c. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/PP5_Fuel_Economy_FINAL_WEB_Oct_2012.pdf>. Acesso em: 1 mai. 2015.

_____. *Key world energy statistics*. Paris, France: IEA, 2013a. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/>>. Acesso em: 21 abr. 2015.

_____. *Oil crises and climate challenges: 30 years of energy use in IEA countries*. Paris, France: OECD Publishing, 2004.

_____. *Technology roadmap: Biofuels for transport*. Paris, France: IEA, 2011b. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name-3976-en.html>>. Acesso em: 21 abr. 2015.

_____. *Technology roadmap: Electric and plug-in hybrid electric vehicles (EV/PHEV)*. Paris, France: IEA, 2011a. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EV_PHEV_Roadmap.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2015.

_____. *Technology roadmap: Fuel economy of road vehicles*. Paris, France: IEA, 2012b. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Fuel_Economy_2012_WEB.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2015.

_____. *Transport, energy and CO₂ – Moving toward sustainability*. Paris, France: IEA, 2009. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/transport2009.pdf>>. Acesso em: 21 abr. 2015.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION – IMO. *Second IMO study 2009*. Londres, Inglaterra: IMO, 2009. Disponível em: <http://www.imo.org/blast/blastDataHelper.asp?data_id=27795>. Acesso em: 14 jan. 2012.

INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM/ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT – ITF/OECD. *Moving freight with better trucks*. Paris, France: ITF/OECD, 2010. Disponível em: <<http://www.internationaltransportforum.org/jtrc/infrastructure/heavyveh/TrucksSum.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2012.

ITAIPU. *Projeto veículo elétrico*. Disponível em: <<http://www2.itaipu.gov.br/ve/>>. Acesso em: 22 nov. 2014.

IVECO. *Elevada qualidade em design e aerodinâmica*. Disponível em: <<http://web.iveco.com/portugal/produtos/pages/stralis-hi-way-elevada-qualidade-em-design-e-aerodinamica.aspx>>. Acesso em: 19 jul. 2014.

JAE-WON LIM et al. *Design of magnetic levitation electromagnet for high speed maglev train*. IEEE, out. 2013. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6713227>>. Acesso em: 4 ago. 2014.

JANNUZZI, G. D. M.; SWISHER, J. N. P. *Planejamento integrado de recursos energéticos: meio ambiente, conservação de energia e fontes renováveis*. Campinas: Autores Associados, 1997.

JAPAN AUTOMOBILE MANUFACTURERS ASSOCIATION – JAMA. *Reducing CO₂ emissions in the global road transport sector*. Tokyo, Japan: JAMA, 2008. Disponível em: <http://english.jp/publications/2008_CO2_RoadTransport.pdf>. Acesso em: 2 out. 2013.

JAPAN. Railway Technical Research Institute – RTRI. *Research and development*. Disponível em: <<http://www.rtri.or.jp/eng/index.html>>. Acesso em: 4 ago. 2014.

JAYAWANT, B. V. *Electromagnetic levitation and suspension techniques*. London, UK: E. Arnold, 1981.

JIANG, D. H. et al. Levitation Force for Evaluation of the High Temperature Superconducting Maglev Vehicle Under Derailment. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 22, n. 3, p. 3600304-3600304, jun. 2012.

JOHANSSON, U. Ethanol Buses – experiences and prospects for sustainable urban transport. In: *Bioethanol and the road to sustainable transport*. Londres, Inglaterra, 2006. Disponível em: <http://www.baff.info/filer/bioethanolondon/6_scania.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2011.

JR, H. J. The Vehicle Adaptation to Ethanol Fuel. In: *Royal Society Multilateral Second Generation Biofuels Event*. London, UK, 2007. Disponível em: <http://www.desenvolvimento.gov.br/arquivos/dwnl_1399915719.pdf>. Acesso em: 22 out. 2015.

KAJIWARA, A. *Overview of FY2020 fuel efficiency standards for passenger vehicles*, 2012. Disponível em: <<http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2012/wp29grpe/GRPE-63-07e.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2015.

KARPLUS, V. J.; PALTSEV, S.; REILLY, J. M. Prospects for plug-in hybrid electric vehicles in the United States and Japan: A general equilibrium analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 44, n. 8, p. 620-641, out. 2010.

KIMURA, O. *Japanese top runner approach for energy efficiency standards*, 2010. Disponível em: <<http://www.climatepolicy.jp/thesis/pdf/09035dp.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2015.

KOLIEB, E.; SAVITZ, J. *Shipping solutions: Technological and operational methods available to reduce CO₂*. [s.l.] Oceana, out. 2010. Disponível em: <http://oceana.org/sites/default/files/reports/Shipping_report_2010.pdf>. Acesso em: 22 out. 2015.

KROMER, M.; BOCKHOLT, W.; JACKSON, M. *Assessment of fuel economy technologies for medium-and heavy-duty vehicles*. [s.l.] TIAX LLC, 2009.

KUEHN, L. et al. Static and Dynamic Behavior of a Superconducting Magnetic Bearing Using YBCO Bulk Material. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, n. 2, p. 2079-2082, jun. 2007.

KUMAR, L.; JAIN, S. Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 29, p. 924-940, jan. 2014.

KURZWEIL, P. Gaston Planté and his invention of the lead – acid battery – The genesis of the first practical rechargeable battery. *Journal of Power Sources*, v. 195, n. 14, p. 4424-4434, 15 jul. 2010.

KUTZ, M. (ED.). *Environmentally conscious transportation*. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2008.

LABORATÓRIO DE TRANSPORTES E LOGÍSTICA – Labtrans. *PNIH - Plano Nacional de Integração Hidroviária*. Brasília: Labtrans, 19 fev. 2013. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br/portal/PNIH/ApresentacaoPNIHLancamento19Fev2013.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2014.

LAJUNEN, A. Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 38, p. 1-15, jan. 2014.

LEE, C. Y. et al. Conceptual Design of Superconducting Linear Synchronous Motor for 600-km/h Wheel-Type Railway. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 24, n. 3, p. 1-4, jun. 2014.

LIIMATAINEN, H. et al. Energy efficiency of road freight hauliers – A Nordic comparison. *Energy Policy*, v. 67, p. 378-387, abr. 2014.

LIMA, B. J. Novo marco regulatório do setor ferroviário. In: *Audiência Pública – 10/04/2013*. Brasília, 2013. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cvt/audiencias-publicas/arquivos-de-apresentacao/audiencia-publica-10-04-2013/vale-c-bento-jose-de-lima/view>>. Acesso em: 9 mai. 2015.

LUCAS, A.; ALEXANDRA SILVA, C.; COSTA NETO, R. Life cycle analysis of energy supply infrastructure for conventional and electric vehicles. *Energy Policy*, v. 41, p. 537-547, fev. 2012.

LUGUANG, Y. Progress of the Maglev Transportation in China. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 16, n. 2, p. 1138-1141, jun. 2006.

LUTSEY, N. A technical analysis of model year 2011 US automobile efficiency. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 17, n. 5, p. 361-369, jul. 2012.

MACEDO, I. DE C.; LEAL, M. R. L. V.; SILVA, J. E. A. R. DA. *Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil*. São Paulo, Brasil: [s.n.]. Disponível em: <www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=11168105>. Acesso em: 14 out. 2014.

MAHLIA, T. M. I.; TOHNO, S.; TEZUKA, T. A global review of success story on implementation of fuel economy standard for passenger cars: Lesson for other countries. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, v. 29, p. 947-972, 2011.

_____. International experience on incentive program in support of fuel economy standards and labelling for motor vehicle: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 25, p. 18-33, 2013.

MAROUN, C.; SCHAEFFER, R. Emulating new policy goals into past successes: Greenhouse gas emissions mitigation as a side effect of biofuels programmes in Brazil. *Climate and Development*, v. 4, n. 3, p. 187-198, jul. 2012.

MARTINS, W. C. et al. *Estudo de baixo carbono para o Brasil – Transportes*. Brasília: BIRD, 2010. Disponível em: <<http://www.esmap.org/node/1215>>. Acesso em: 13 jan. 2013.

MATTOS, J. A. B.; CORREIA, E. L. Uma nova estimativa da frota de veículos automotivos no Brasil. In: *VII Congresso Brasileiro de Energia – CBE*. Rio de Janeiro, Brasil: 1996.

MCCOLLUM, D.; GOULD, G.; GREENE, D. *Greenhouse gas (GHG) emissions from aviation and marine transportation*. Califórnia, Estados Unidos: Pew Center on Global Climate Change, dez. 2009. Disponível em: <<http://www.c2es.org/docUploads/aviation-and-marine-report-2009.pdf>>. Acesso em: 27 out. 2015.

MEKHILEF, S.; SAIDUR, R.; SAFARI, A. Comparative study of different fuel cell technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 1, p. 981-989, jan. 2012.

MELO, P.; RIBAU, J.; SILVA, C. Urban Bus Fleet Conversion to Hybrid Fuel Cell Optimal Powertrains. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, v. 111, p. 692-701, fev. 2014.

MENDES, F. E. *Avaliação de programas de controle de poluição atmosférica por veículos leves no Brasil*, 2004. Disponível em: <<http://ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/femendes.pdf>>. Acesso em: 30 set. 2014.

MERCEDES-BENZ. *Eletra apresenta primeiro ônibus elétrico brasileiro*. Disponível em: <<http://mercedes-benz.com.br/institucional/imprensa/releases/onibus/2013/11/1166-eletra-apresenta-primeiro-onibus-eletrico-brasileiro>>. Acesso em: 4 jul. 2014.

METZ, D. Peak Car and Beyond: The Fourth Era of Travel. *Transport Reviews*, v. 33, n. 3, p. 255-270, 2013.

MICHELIN. *Michelin truck and bus tyre service manual*. [s.l.] Michelin Truck & Bus, 2009. Disponível em: <<http://www.michelintransport.in/Home/Michelin-Dealers/Tyre-Services/Service-Manual>>. Acesso em: 1 jan. 2011.

MIDLER, C.; BEAUME, R. Project-based learning patterns for dominant design renewal: The case of Electric Vehicle. *International Journal of Project Management*, v. 28, n. 2, p. 142-150, fev. 2010.

MILANEZ, A. Y. et al. *Logística para o etanol: situação atual e desafios futuros*. Rio de Janeiro: BNDES, 2010. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set3102.pdf>. Acesso em: 1 jan. 2011.

MITSUBISHI. *What is i MiEV – Specifications*. Disponível em: <<http://www.mitsubishi-motors.com/special/ev/whatis/index.html>>. Acesso em: 31 maio 2014.

MOCK, P.; YANG, Z. *Driving electrification: A global comparison of fiscal incentive policy for electric vehicles*. Washington DC, USA: ICCT, 2014. Disponível em: <http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EV-fiscal-incentives_20140506.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2015.

MOON, F. C. *Superconducting levitation: applications to bearings and magnetic transportation*. New York: Wiley, 1994.

MORAES, N. G. *Avaliação das tendências da demanda de energia no setor de transportes no Brasil*. 2005. 167 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MOREIRA, J. R.; GOLDEMBERG, J. The alcohol program. *Energy Policy*, v. 27, n. 4, p. 229-245, abr. 1999.

MOURA, G. A.; ROCHA, C. H.; RONCHI, R. D. C. Mensuração do custo social subjacente à atual frota autônoma de caminhões da agropecuária nacional - um estudo de caso: soja, café e boi em pé. *Journal of Transport Literature*, v. 7, n. 2, p. 52-77, abr. 2013.

MURGEL, E. M. *Veículos automotores – O Proálcool e a qualidade do ar*. Rio de Janeiro: CNI, 1990.

NAKASHIMA, H. The superconducting magnet for the Maglev transport system. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 30, n. 4, p. 1572-1578, jul. 1994.

NEVES, N. P.; PINTO, C. S. Licensing a fuel cell bus and a hydrogen fueling station in Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 38, n. 19, p. 8215-8220, jun. 2013.

NEXT GREEN CAR. *New car search – CO₂, MPG, car tax band*. Disponível em: <<http://www.nextgreencar.com/new-car-search/>>. Acesso em: 17 jul. 2014.

NISHIJIMA, S. et al. Superconductivity and the environment: a Roadmap. *Superconductor Science and Technology*, v. 26, n. 11, p. 113001, 1 nov. 2013.

NISSAN. *Nissan assina acordo de cooperação e intercâmbio científico e tecnológico na área de uso de veículos elétricos com a UFRJ*. Disponível em: <<http://nissannews.com/pt/nissan/brasil/releases/nissan-assina-acordo-de-coopera-o-e-intercmbio-cient-fico-e-tecnol-gico-na-rea-de-uso-de-ve-culos-el-tricos-com-a-ufrj?query=leaf>>. Acesso em: 22 jul. 2014a.

_____. *Nissan Leaf*. Disponível em: <<http://www.nissanusa.com/electric-cars/leaf/>>. Acesso em: 31 maio. 2014b.

NOGUEIRA, A. H.; BRANCO, G. M. *Promovendo a eficiência energética nos automóveis brasileiros*. 2005. Disponível em: <<http://www.etanolveicular.inee.org.br/downloads/eficiencia-automoveis-brasileiros.pdf>>. Acesso em: 29 set. 2014.

NORTH AMERICAN COUNCIL FOR FREIGHT EFFICIENCY – NACFE. *Executive Report – Wide Base Tires*. [s.l.] North American Council for Freight Efficiency, 2010. Disponível em: <<http://nacfe.org/wp-content/uploads/2010/12/NACFE-ER-1002-Wide-Base-Tires-Dec-2010.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2014.

NOVAES, A. G. et al. Rodoviário, ferroviário ou marítimo de cabotagem? O uso da técnica de preferência declarada para avaliar a intermodalidade no Brasil. *Transportes*, v. XIV, n. 2, p. 11-17, dez. 2006.

PARK, D. Y.; SHIN, B. C.; HAN, H. Korea's Urban Maglev Program. *Proceedings of the IEEE*, v. 97, n. 11, p. 1886-1891, nov. 2009.

PEREIRA, D. B. S. *Análise do impacto das condições de rodovias pavimentadas na renovação da frota de transporte rodoviário de carga*. 2006. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

PEW. *History of fuel economy*. [s.l.] The Pew Environment Group, 2011.

PINTO, L. S. *Elaboração de cenários a partir de modelos econométricos de previsão da taxa de motorização brasileira em 2020*. 2010. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

Plataform for Aerodynamic Road Transport – PART. *Aerodynamics*. Disponível em: <<http://www.part20.eu/en/background/aerodynamics/>>. Acesso em: 19 jul. 2014.

POLLET, B. G.; STAFFELL, I.; SHANG, J. L. Current status of hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: From electrochemistry to market prospects. *Electrochimica Acta*, v. 84, p. 235-249, dez. 2012.

POURREZA, S. *Economic analysis of high speed rail*. Trondheim, Noruega: Norwegian University of Science and Technology, 2011. Disponível em: <<http://jernbaneforskning.no/files/pages/554/2011-pourreza-master.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2014.

RAIL MOTOR SOCIETY. *The 2-stroke diesel cycle*. Disponível em: <http://railmotorsociety.org.au/rm_engine_diesel_page.htm>. Acesso em: 14 fev. 2015.

RAPER, D. *UK aviation: Carbon reduction futures*. Cranfield, UK: Cranfield University, 2009. Disponível em: <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/3577/1/UK_Aviation_Carbon_Reduction_Futures-2009.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2015.

RENAULT. SM3 Z.E. Disponível em: <<http://www.renault.com/en/vehicules/aujourd-hui/renault-vehicules-electriques/pages/fluence-ze.aspx>>. Acesso em: 5 jun. 2014.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY – REN21. *Renewables 2014 – Global Status Report*. Paris, France: Renewable Energy policy Network for the 21st Century, 2014. Disponível em: <http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2015.

REXED, I.; LAGERGREN, C.; LINDBERGH, G. Effect of sulfur contaminants on MCFC performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 39, n. 23, p. 12242-12250, abr. 2014.

RIO DE JANEIRO. Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos – IPP. *Passageiros transportados no sistema hidroviário* – Município do Rio de Janeiro – 1994-2012. Rio de Janeiro: IPP, 2014. Disponível em: <<http://www.armazemdedados.rio.rj.gov.br/>>. Acesso em: 31 dez. 2014.

ROKNI, M. Thermodynamic analysis of SOFC (solid oxide fuel cell)–Stirling hybrid plants using alternative fuels. *Energy*, v. 61, p. 87-97, nov. 2013.

RONCHI, R. D. C.; MOURA, G. A.; ROCHA, C. H. Mensuração do custo social subjacente à atual frota autônoma de caminhões da agropecuária nacional - um estudo de caso: soja, café e boi em pé. *Journal of Transport Literature*, v. 7, n. 2, p. 52-77, abr. 2013.

RYAN, L.; FERREIRA, S.; COVERY, F. The impact of fiscal and other measures on new passenger car sales and CO₂ emissions intensity: Evidence from Europe. *Energy Economics*, v. 31, p. 365-374, 2009.

SANTANA, W. A. *Proposta de diretrizes para planejamento e gestão ambiental do transporte hidroviário no Brasil*. 2008. 277 f. Tese (Doutorado em Engenharia) –Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SCHACH, R.; JEHL, P.; NAUMANN, R. *Transrapid und rad-schiene-hochgeschwindigkeitsbahn ein gesamtheitlicher systemvergleich*. Berlin: Springer, 2006.

SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. *Análise dos impactos da taxaço de carbono sobre empresas de petróleo*. Rio de Janeiro: PPE/UFRJ, 2008.

SCHAEFFER, R.; SZKLO, A.; MACHADO, G. *Matriz energética brasileira 2003-2023*. Rio de Janeiro: PPE/UFRJ, 2004.

SCHAFER, A.; VICTOR, D. G. The future mobility of the world population. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 34, n. 3, p. 171-205, 2000.

SHARAF, O. Z.; ORHAN, M. F. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 32, p. 810-853, abr. 2014.

SIMÕES, A. F. *O transporte aéreo brasileiro no contexto de mudanças climáticas globais: emissões de CO₂ e alternativas de mitigação*. 2003. 321 f. Tese (Doutorado em Ciências do Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

SIVAK, M.; SCHOETTLE, B. Eco-driving: Strategic, tactical, and operational decisions of the driver that influence vehicle fuel economy. *Transport Policy*, v. 22, p. 96-99, jul. 2012.

SKYSAILS. *Turn wind into profit*. Hamburgo, Alemanha: Skysails Marine, 2011. Disponível em: <http://downloads.german-pavilion.com/downloads/pdf/exhibitor_18448.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2016.

SMART EV. *Driving dynamics*. Disponível em: <<http://www.smart-electric-drive.com/en-UK/#/driving-dynamics/>>. Acesso em: 31 maio 2014.

SOLAR IMPULSE S.A. *Solar impulse* – Exploration to change the world. Disponível em: <<http://www.solarimpulse.com/>>. Acesso em: 27 fev. 2016.

SØRENSEN, B. Fuel cells. In: *Hydrogen and Fuel Cells*. [s.l.] Elsevier, 2005, p. 113-207.

SOTELO, G. G. et al. MagLev Cobra: Test Facilities and Operational Experiments. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 507, n. 3, p. 032017, 12 maio 2014.

SPEED MASTI. *Reva Review, Reva Specifications, Specs*. Speed Masti Indian Cars and Bike. Disponível em: <<http://www.speedmasti.com/indian-cars/reva-electric-car/reva-small-car-big-savings/>>. Acesso em: 31 maio 2014.

STEPHAN, R. M.; DE ANDRADE, R.; FERREIRA, A. C. Superconducting Light Rail Vehicle: A Transportation Solution for Highly Populated Cities. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, v. 7, n. 4, p. 122-127, dez. 2012.

SUPRATRANS. *SupraTrans* – Project. Disponível em: <<http://www.supratrans.de/index.php?id=2&L=1&id=2>>. Acesso em: 4 ago. 2014.

SWAFEA. *Sustainable way for alternative fuels and energy in aviation: final report*. Disponível em: <http://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Documents/SW_WP9_D.9.1%20Final%20report_released%20July2011.pdf>. Acesso em 17 out. 2015.

SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Alternative energy sources or integrated alternative energy systems? Oil as a modern lance of Peleus for the energy transition. *Energy*, v. 31, n. 14, p. 2513-2522, 2006.

SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Fuel specification, energy consumption and CO₂ emission in oil refineries. *Energy*, v. 32, n. 7, p. 1075-1092, jul. 2007.

TAGHAVIFAR, H.; MARDANI, A. Investigating the effect of velocity, inflation pressure, and vertical load on rolling resistance of a radial ply tire. *Journal of Terramechanics*, v. 50, n. 2, p. 99-106, abr. 2013.

TOSCA. *Techno-economic analysis of aircraft*. Technology Opportunities and Strategies towards Climate friendly transport, 2011. Disponível em: <http://www.toscaproject.org/FinalReports/TOSCA_WP2_Aircraft.pdf>. Acesso em: 27 out. 2015.

TRANSRAPID. *ThyssenKrupp Transrapid GmbH*. Disponível em: <<http://www.transrapid.de/cgi/de/basics.prg>>. Acesso em: 4 ago. 2014.

TRINDADE, J. *Hidrodinâmica e propulsão*. Escola Superior Náutica Infante D. Henrique, 2012. Disponível em: <<http://www.enautica.pt/publico/professores/jorgetrindade/HidroProp/Docs/HidroPropulsao.pdf>>. Acesso em: 22 mai. 2015.

TRUK. *Produto Nacional do Transporte Rodoviário de Cargas – PTRC: O modelo TRUK de cálculo*. Brasília: TRUK Consultoria, 2004.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARIANA – UFSC. *A intervenção do transporte na paisagem urbana*. Disponível em: <http://www.arq.ufsc.br/arq5661/trabalhos_2009-2/transportes_urbanos/pages/metro.html>. Acesso em: 13 out. 2012.

UK. Department for Environment Food & Rural Affairs – DEFRA (UK). *Government GHG Conversion Factors for Company Reporting: Methodology paper for emission factors*. London, UK: Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2013. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/224437/pb13988-emission-factor-methodology-130719.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2015.

UK. Department for Transport – DFT. *Fuel ready reckoner*. London, UK: DFT, 2010a. Disponível em: <<http://bl.fuelreadyreckoner.org.uk/>>. Acesso em: 27 nov. 2015.

_____. *Future aircraft fuel efficiencies*. London, UK: DFT, 2010b. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/4515/future-aircraft-fuel-efficiency.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2015.

_____. *Guidance on local transport plans*. London, UK: DFT, 2009. Disponível em: <<http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20110509101621/http://www.dft.gov.uk/adobe/pdf/165237/ltp-guidance.pdf>>. Acesso em: 27 nov. 2015.

UK. Freight Transport Association – FTA. *Carbon intervention modelling tool*. FTA, 2012. Disponível em: <http://www.fta.co.uk/policy_and_compliance/environment/decarbonisation_tool.html>. Acesso em: 27 nov. 2015.

UK. Network Rail. *Comparing environmental impact of conventional and high speed rail*. London, UK: Network Rail, 2009. Disponível em: <http://www.networkrail.co.uk/5878_Comparingenvironmentalimpactofconventionalandhighspeedrail.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2015.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAM – UNEP. *The European Union Automotive Fuel Economy Policy*. [s.l.] UNEP, 2011. Disponível em: <United Nations Environment Program /transport/gfei/autotool/case_studies/europe/cs_eu_0.asp#p1>. Acesso em: 17 jan. 2014.

UNIVERSITY OF TECHNOLOGY GRAZ – UTG. *Reduction and Testing of Greenhouse Gas Emissions from Heavy Duty Vehicles – LOT 2*. UTG: Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics, 2012. Disponível em: <http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy/docs/hdv_2011_01_09_en.pdf>. Acesso em: 22 set. 2014.

USA. Department of Energy – DOE. *Vehicle technologies office*. Disponível em: <<http://energy.gov/eere/vehicles/vehicle-technologies-office>>. Acesso em: 31 maio. 2014.

USA. Department of Transportation – DOT. *Applications for the environment: Real-Time Information Synthesis (AERIS)*. Washington DC, USA: U.S. DOT, 2013. Disponível em: <<http://www.its.dot.gov/aeris/pdf/Eco-SignalOperationsConOps021814.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2015.

_____. *Best practices and strategies for improving rail energy efficiency*. Washington DC, USA: U.S. DOT, 2014. Disponível em: <<http://www.volpe.dot.gov/news/new-report-best-practices-and-strategies-improving-rail-energy-efficiency>>. Acesso em: 15 out. 2015.

USA. Environmental Protection Agency – EPA. *Gas guzzler tax*. [s.l.] EPA, 2012a. Disponível em: <<http://www.epa.gov/fueleconomy/guzzler/420f12068.pdf>>. Acesso em: 17 jan. 2015.

_____. *EPA and NHTSA set standards to reduce greenhouse gases and improve fuel economy for model years 2017-2025 cars and light trucks*. [s.l.] EPA, 2012b. Disponível em: <<http://www.epa.gov/otaq/climate/documents/420f12051.pdf>>. Acesso em: 11 jan. 2015.

_____. *Regulatory impact analysis: Final rulemaking for 2017-2025 light-duty vehicle greenhouse gas emission standards and corporate average fuel economy standards*. [s.l.] EPA, 2012c. Disponível em: <<http://www.epa.gov/otaq/climate/documents/420r12016.pdf>>. Acesso em: 17 jan. 2015.

_____. *Hydraulic hybrid research: Clean automotive technology*. [s.l.] EPA, 18 mar. 2015. Disponível em: <<http://www.epa.gov/otaq/technology/research/research-hhvs.htm>>. Acesso em: 11 jan. 2015.

USA. Fuel Economy. *All-electric vehicles*. Disponível em: <<http://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml>>. Acesso em: 14 maio 2014b.

_____. *Energy requirements for combined city/highway driving*. Disponível em: <<http://www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml>>. Acesso em: 6 maio 2014a.

USA. Idaho National Laboratory – INL. *Advanced vehicle testing activity*. Disponível em: <<http://avt.inl.gov/>>. Acesso em: 31 maio 2014a.

_____. *Full size battery electric vehicles*. Disponível em: <<http://avt.inl.gov/fsev.shtml>>. Acesso em: 7 jun. 2014b.

USA. National Highway Traffic Safety Administration – NHTSA. *NHTSA and EPA set standards to improve fuel economy and reduce greenhouse gases for passenger cars and light trucks for model years 2017 and beyond*. [s.l.] NHTSA, 2011. Disponível em: <http://www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/cafe/CAFE_2017-25_Fact_Sheet.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2015.

USA. Oak Ridge National Laboratory – ORNL. *Owner related fuel economy improvements*. Washington DC, USA: ORNL, 2001. Disponível em: <<https://www.fueleconomy.gov/feg/pdfs/OwnerRelatedFuelEconomyImprovements.pdf>>. Acesso em: 17 jan. 2015.

_____. *Vehicle technologies market report*. Washington DC, USA: ORNL, 2013. Disponível em: <http://cta.ornl.gov/vtmarketreport/pdf/2013_vtmarketreport_full_doc.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2015.

VALSERA-NARANJO, E. et al. *Electrical vehicles: State of art and issues for their connection to the network*. IEEE, 2009. Acesso em: 19 jul. 2014.

VELÁZQUEZ, R. S. G. V.; KUBOTANI, R. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G. Novos combustíveis para a aviação: Um estudo de caso. *Revista Mackenzie de Engenharia e Computação*, v. 12, n. 1, p. 77-93, 2012.

VELLOSO, F. Impacto da idade média da frota de veículos no Brasil. In: *Seminário Internacional Frotas & Fretes Verdes*. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://www.frotasefretesverdes.com.br/2012/palestras/Fabio%20Velloso.pdf>>. Acesso em: 13 jan. 2014.

VERGARA, J.; MCKESSON, C.; WALCZAK, M. Sustainable energy for the marine sector. *Energy Policy*, v. 49, p. 333-345, jul. 2012.

VERHAERT, I. et al. Thermal and electrical performance of an alkaline fuel cell. *Applied Thermal Engineering*, v. 40, p. 227-235, jul. 2012.

VEZIROGLU, A.; MACARIO, R. Fuel cell vehicles: State of the art with economic and environmental concerns. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 36, n. 1, p. 25-43, jan. 2011.

VLIET, O. VAN et al. Energy use, cost and CO₂ emissions of electric cars. *Journal of Power Sources*, v. 196, n. 4, p. 2298-2310, fev. 2011.

VON SPAKOVSKY, M. R.; OLSOMMER, B. Fuel cell systems and system modeling and analysis perspectives for fuel cell development. *Energy Conversion and Management*, v. 43, n. 9-12, p. 1249-1257, jun. 2002.

VYAS, A. D.; PATEL, D. M.; BERTRAM, K. M. *Potential for energy efficiency improvement beyond the light-duty-vehicle sector: Transportation energy futures series*. Argonne, IL: U.S. Department of Energy, 2013. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/55637.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2014.

WANG, C.; WANG, K. *A study on environmental impact of high speed maglev traffic engineering*. IEEE, ago. 2010. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5576917>>. Acesso em: 14 ago. 2015.

WARTSILA. *Boosting energy efficiency*. Finlândia: Wärtsilä Corporation, 2010. Disponível em: <<http://www.wartsila.com/file/Wartsila/en/1270037230672a1267106724867-wartsila-sp-b-wartsila-boosing-eneqy.pdf>>. Acesso em: 13 jan. 2011.

WESTMAN, B. *Ethanol fuel in diesel engines for energy efficiency*, 2010. Disponível em: <http://www.baff.info/Filer/SustainableEthanol08/Westman_SCANIA.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2015.

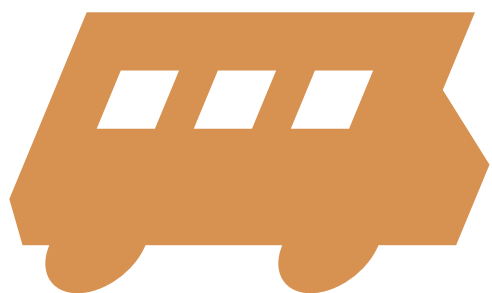
WOODROOFFE, J.; ASH, L. *Economic efficiency of long combination transport vehicles in Alberta*. San Juan, Puerto Rico: Woodrooffe & Associates, mar. 2001. Disponível em: <<http://www.transportation.alberta.ca/Content/docType61/production/LCVEconomicEfficiencyReport.pdf>>. Acesso em: 27 fev. 2015.

YIN, M.; BERTOLINI, L.; DUAN, J. The effects of the high-speed railway on urban development: International experience and potential implications for China. *Progress in Planning*, v. 98, n. 32, p. 1-52, jun. 2014.

YOSHIHIDE, Y. et al. The latest status of the project of tobu kyuryo line in Nagoya. *Proceedings of International Symposium on Seed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems: STECH*, p. 447-452, 2003.

ZHAN, F. et al. Characteristics of Ni/MH power batteries and its application to electric vehicles. *Journal of Alloys and Compounds*, CIDADE, v. 293-295, p. 804-808, dez. 1999.

ZHU, X.; GUO, Z.; HOU, Z. Solar-powered airplanes: A historical perspective and future challenges. *Progress in Aerospace Sciences*, v. 71, p. 36-53, nov. 2014.



Anexo

ANEXO – TAXA DE CRESCIMENTO DAS MERCADORIAS TRANSPORTADAS

Tabela 134 – Taxa de Crescimento Médio Anual do Valor Bruto de Produção das Mercadorias Transportadas

Mercadoria	Período							
	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50
Arroz em casca	2,23	2,24	2,30	2,07	1,81	1,55	1,31	1,08
Milho em grão	2,33	2,19	2,03	1,90	1,72	1,53	1,33	1,13
Trigo em grão e outros cereais	2,53	2,48	2,45	2,12	1,82	1,53	1,28	1,05
Cana-de-açúcar	1,96	1,87	1,81	1,62	1,40	1,17	0,95	0,74
Soja em grão	2,44	2,17	1,90	1,78	1,62	1,43	1,24	1,04
Outros produtos e serviços da lavoura	2,39	2,30	2,22	1,99	1,75	1,51	1,28	1,07
Mandioca	2,38	2,28	2,20	2,00	1,78	1,55	1,33	1,12
Fumo em folha	1,85	1,84	1,82	1,59	1,36	1,14	0,94	0,75
Algodão herbáceo	1,34	1,61	1,89	1,63	1,38	1,16	0,96	0,77
Frutas cítricas	2,31	2,21	2,13	1,94	1,72	1,50	1,28	1,07
Café em grão	2,51	2,23	1,96	1,83	1,66	1,47	1,27	1,07
Produtos da exploração florestal e da silvicultura	2,18	2,19	2,19	1,96	1,73	1,49	1,28	1,07
Bovinos e outros animais vivos	2,00	2,18	2,23	2,08	1,90	1,71	1,51	1,32
Leite de vaca e de outros animais	2,00	2,07	2,14	1,99	1,80	1,59	1,39	1,19
Suínos vivos	2,03	2,14	2,22	2,04	1,84	1,62	1,41	1,20
Aves vivas	2,03	2,09	2,18	2,02	1,82	1,61	1,40	1,20
Ovos de galinha e de outras aves	1,98	2,10	2,19	2,04	1,85	1,64	1,44	1,25
Pesca e aquicultura	2,14	2,30	2,43	2,23	2,01	1,78	1,57	1,36
Petróleo e gás natural	7,69	5,92	5,28	3,77	2,59	1,62	0,78	0,06
Minério de ferro	4,23	2,26	0,25	0,96	1,38	1,58	1,62	1,56
Carvão mineral	1,43	3,10	4,47	3,20	2,22	1,53	1,04	0,68

Mercadoria	Período							
	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50
Minerais metálicos não ferrosos	1,40	2,58	3,47	2,65	2,00	1,52	1,17	0,90
Minerais não metálicos	1,46	2,91	4,09	2,98	2,12	1,52	1,07	0,74
Abate e preparação de produtos de carne	1,89	1,88	1,92	1,78	1,59	1,38	1,18	0,98
Carne de suíno fresca, refrigerada ou congelada	1,98	1,96	1,97	1,84	1,67	1,47	1,27	1,07
Carne de aves fresca, refrigerada ou congelada	1,96	1,92	1,91	1,79	1,62	1,42	1,23	1,03
Pescado industrializado	1,98	2,08	2,24	1,98	1,71	1,46	1,22	1,00
Conservas de frutas, legumes e outros vegetais	2,06	2,05	2,07	1,90	1,69	1,47	1,26	1,05
Óleo de soja em bruto e tortas, bagaços e farelo de soja	1,96	1,90	1,88	1,76	1,59	1,40	1,20	1,00
Outros óleos e gordura vegetal e animal, exclusive milho	2,08	2,21	2,38	2,11	1,83	1,56	1,32	1,09
Óleo de soja refinado	1,90	1,90	1,95	1,80	1,60	1,39	1,18	0,98
Leite resfriado, esterilizado e pasteurizado	1,79	1,84	1,95	1,77	1,57	1,35	1,14	0,93
Produtos do laticínio e sorvetes	1,95	2,01	2,11	1,91	1,68	1,45	1,24	1,03
Arroz beneficiado e produtos derivados	1,95	2,00	2,10	1,87	1,63	1,39	1,17	0,96
Farinha de trigo e derivados	1,93	2,03	2,18	1,93	1,68	1,43	1,20	0,98
Farinha de mandioca e outros	2,10	2,07	2,08	1,89	1,67	1,44	1,22	1,01
Óleos de milho, amidos e féculas vegetais e rações	1,84	1,91	2,00	1,81	1,59	1,37	1,15	0,95
Produtos das usinas e do refino de açúcar	1,98	1,91	1,89	1,77	1,60	1,40	1,20	1,00
Café torrado e moído	1,88	1,93	2,03	1,85	1,64	1,42	1,21	1,00
Café solúvel	1,95	1,89	1,89	1,77	1,60	1,40	1,20	1,00
Outros produtos alimentares	1,90	1,94	2,03	1,83	1,61	1,39	1,17	0,96
Bebidas	2,00	2,14	2,33	2,02	1,73	1,46	1,22	0,99
Produtos do fumo	1,34	1,45	1,62	1,32	1,04	0,79	0,57	0,37

Mercadoria	Período							
	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50
Beneficiamento de algodão e de outros têxteis e fiação	0,83	1,43	2,06	1,65	1,32	1,05	0,84	0,66
Tecelagem	0,47	1,09	1,75	1,41	1,13	0,91	0,73	0,57
Fabricação de outros produtos têxteis	0,82	1,41	2,03	1,63	1,30	1,04	0,83	0,63
Artigos do vestuário e acessórios	-1,31	-0,67	0,14	0,28	0,37	0,41	0,41	0,37
Preparação do couro e fabricação de artefatos, exclusive calçados	1,65	1,60	1,59	1,65	1,63	1,56	1,47	1,35
Fabricação de calçados	1,52	1,50	1,51	1,55	1,52	1,44	1,35	1,22
Produtos de madeira, exclusive móveis	-3,57	-2,17	-1,10	-0,24	0,29	0,59	0,74	0,79
Celulose e outras pastas para fabricação de papel	1,58	1,44	1,31	1,32	1,22	1,08	0,92	0,75
Papel e papelão, embalagens e artefatos	1,55	1,59	1,63	1,53	1,37	1,18	1,00	0,82
Jornais, revistas, discos e outros produtos gravados	1,56	2,13	2,55	2,24	1,95	1,70	1,47	1,27
Gás liquefeito de petróleo	3,60	3,29	3,28	2,56	1,95	1,44	0,98	0,59
Gasolina automotiva	2,55	2,52	2,55	2,21	1,88	1,57	1,27	1,00
Gasóilcool	2,35	2,42	2,50	2,20	1,90	1,61	1,34	1,08
Óleo combustível	2,54	2,43	2,35	2,11	1,85	1,59	1,32	1,07
Óleo diesel	2,47	2,62	2,80	2,36	1,97	1,61	1,29	1,01
Outros produtos do refino de petróleo e coque	2,47	2,63	2,83	2,37	1,95	1,57	1,24	0,95
Álcool	2,09	1,90	1,71	1,51	1,29	1,06	0,83	0,61
Produtos químicos inorgânicos	1,97	2,86	3,64	2,82	2,16	1,67	1,29	0,99
Produtos químicos orgânicos	1,93	2,80	3,58	2,77	2,13	1,65	1,28	0,98
Fabricação de resina e elastômeros	0,01	1,12	2,05	1,69	1,36	1,10	0,91	0,74
Produtos farmacêuticos	2,03	3,46	4,62	3,27	2,32	1,65	1,17	0,79
Defensivos agrícolas	0,42	1,42	2,23	1,86	1,51	1,21	0,95	0,71
Perfumaria, sabões e artigos de limpeza	2,33	3,07	3,79	2,86	2,20	1,72	1,36	1,07
Tintas, vernizes, esmaltes e lacas	0,99	1,93	2,38	2,18	2,00	1,83	1,66	1,51

Mercadoria	Período							
	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50
Produtos e preparados químicos diversos	1,27	2,50	3,58	2,74	2,07	1,57	1,20	0,91
Artigos de borracha	0,07	1,35	2,29	2,11	1,90	1,71	1,53	1,37
Artigos de plástico	0,15	1,41	2,33	2,12	1,90	1,69	1,51	1,34
Cimento	1,53	2,22	2,36	2,17	2,00	1,82	1,63	1,45
Outros produtos de minerais não metálicos	0,28	1,38	1,95	1,93	1,86	1,75	1,62	1,49
Gusa e ferroligas	1,25	1,81	2,04	1,92	1,80	1,70	1,61	1,52
Semi-acabados, laminados planos, longos e tubos de aço	1,22	1,92	2,28	2,11	1,95	1,83	1,72	1,62
Produtos da metalurgia de metais não ferrosos	-0,76	0,40	1,20	1,19	1,12	1,04	0,96	0,88
Fundidos de aço	0,53	1,47	2,11	1,88	1,68	1,50	1,35	1,22
Produtos de metal, exclusive máquinas e equipamento	1,55	2,57	3,16	2,65	2,25	1,93	1,68	1,47
Máquinas e equipamentos, inclusive manutenção e reparos	-0,71	1,49	2,92	2,70	2,51	2,36	2,24	2,14
Eletrodomésticos	2,09	2,40	2,70	2,24	1,90	1,63	1,40	1,20
Máquinas para escritório e equipamentos de informática	-0,02	1,80	2,78	2,23	1,79	1,44	1,15	0,91
Máquinas, aparelhos e materiais elétricos	2,45	3,77	4,62	3,86	3,30	2,92	2,66	2,47
Material eletrônico e equipamentos de comunicações	0,56	3,13	4,83	3,66	2,79	2,19	1,77	1,48
Aparelhos/instrumentos médico-hospitalar, medida e óptico	4,50	6,75	8,55	6,04	4,32	3,21	2,49	2,00
Automóveis, camionetas e utilitários	2,74	3,62	4,14	3,82	3,56	3,35	3,16	2,98
Caminhões e ônibus	2,33	2,74	2,47	2,83	3,07	3,20	3,25	3,26
Peças e acessórios para veículos automotores	0,19	1,93	3,12	3,18	3,16	3,12	3,07	3,02
Outros equipamentos de transporte	3,96	4,37	4,43	4,45	4,44	4,46	4,49	4,52
Móveis e produtos das indústrias diversas	-2,40	-1,50	-0,53	-0,28	-0,04	0,14	0,27	0,35
Sucatas recicladas	0,49	1,07	1,48	1,32	1,20	1,12	1,05	1,00
Eletricidade e gás, água, esgoto e limpeza urbana	1,99	2,43	2,78	2,27	1,85	1,50	1,21	0,95

Mercadoria	Período							
	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50
Construção	1,45	2,23	2,31	2,18	2,07	1,94	1,79	1,64
Comércio	1,68	1,89	1,94	1,93	1,84	1,71	1,57	1,41
Transporte de carga	1,62	1,76	1,83	1,73	1,57	1,39	1,21	1,03
Transporte de passageiro	1,76	1,99	2,19	1,98	1,74	1,51	1,29	1,10
Correio	2,07	2,50	2,79	2,52	2,25	2,00	1,77	1,56
Serviços de informação	2,16	2,96	3,49	2,97	2,56	2,23	1,95	1,71
Intermediação financeira e seguros	2,55	3,10	3,45	3,08	2,75	2,44	2,17	1,93
Serviços imobiliários e aluguel	0,47	0,94	1,34	1,66	1,80	1,83	1,79	1,72
Aluguel imputado	-0,15	0,13	0,32	0,90	1,25	1,41	1,48	1,47
Serviços de manutenção e reparação	1,99	2,14	2,34	2,04	1,74	1,46	1,20	0,97
Serviços de alojamento e alimentação	2,60	3,26	3,86	3,07	2,49	2,05	1,70	1,41
Serviços prestados às empresas	0,99	1,92	2,59	2,21	1,88	1,60	1,37	1,17
Educação mercantil	4,98	5,16	5,45	5,34	5,15	4,90	4,66	4,40
Saúde mercantil	4,01	3,99	4,11	4,00	3,82	3,61	3,39	3,17
Serviços prestados às famílias	1,55	1,82	2,22	2,04	1,84	1,62	1,41	1,21
Serviços associativos	1,07	1,21	1,49	1,47	1,40	1,28	1,15	1,01
Serviços domésticos	3,39	3,67	4,06	4,12	4,03	3,86	3,67	3,45
Educação pública	0,17	2,25	2,99	2,84	2,71	2,56	2,39	2,21
Saúde pública	0,17	2,25	2,99	2,84	2,71	2,56	2,39	2,21
Serviço público e seguridade social	0,17	2,25	2,99	2,84	2,71	2,56	2,39	2,21
TOTAL	1,61	2,32	2,73	2,51	2,28	2,07	1,88	1,71

Fonte: HADDAD, 2015

