

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
DEPARTAMENTO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

OLIVIA NASCIMENTO BOLDRINI NICOLAU

**AVALIAÇÃO DO PIB, DA FROTA DE VEÍCULOS E DA EXTENSÃO DE
RODOVIAS NO CONSUMO ENERGÉTICO E EMISSÕES DE DIÓXIDO DE
CARBONO DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DO BRASIL**

SÃO MATEUS

2018

OLIVIA NASCIMENTO BOLDRINI NICOLAU

AVALIAÇÃO DO PIB, DA FROTA DE VEÍCULOS E DA EXTENSÃO DE
RODOVIAS NO CONSUMO ENERGÉTICO E EMISSÕES DE DIÓXIDO DE
CARBONO DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DO BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGEN) da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Energia, na área de concentração em engenharia, tecnologia e gestão.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Gisele de Lorena Diniz Chaves

SÃO MATEUS

2018

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)
(Divisão de Biblioteca Setorial do CEUNES - BC, ES, Brasil)

N639a Nicolau, Olivia Nascimento Boldrini, 1990-
Avaliação do PIB da frota de veículos e da extensão de rodovias no consumo energético e emissões de dióxido de carbono do transporte rodoviário do Brasil / Olivia Nascimento Boldrini Nicolau. – 2018.
127 f. : il.

Orientador: Gisele de Lorena Diniz Chaves.
Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo.

1. Transporte rodoviário. 2. Dióxido de carbono. I. Chaves, Gisele de Lorena Diniz. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Universitário Norte do Espírito Santo. III. Título.

CDU: 620.9

Elaborado por Filipe Briguiet Pereira - CRB-6 ES-000863/O

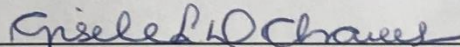
Olivia Nascimento Boldrini

**AVALIAÇÃO DO PIB, DA FROTA DE VEÍCULOS E DA EXTENSÃO
DE RODOVIAS NO CONSUMO ENERGÉTICO E EMISSÕES DE
DIÓXIDO DE CARBONO DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO NO
BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Energia.

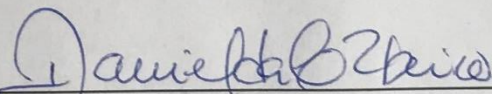
Aprovada em 27 de agosto de 2018.

COMISSÃO EXAMINADORA

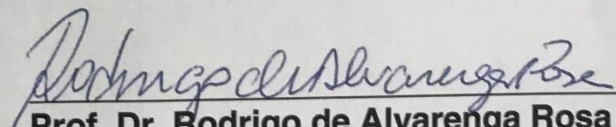


**Prof.^a. Dr.^a. Gisele de Lorena Diniz
Chaves**

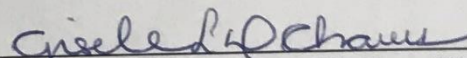
**Universidade Federal do Espírito Santo
Orientadora**



**Prof. Dr. Daniel da Cunha Ribeiro
Universidade Federal do Espírito Santo**



**Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa
Universidade Federal do Espírito Santo**



**Prof. Dr. Glaydston Mattos Ribeiro
Universidade Federal do Rio de Janeiro**

RESUMO

O setor de transporte é um setor chave para o desenvolvimento de um país, posto que ele dá suporte para o desenvolvimento econômico e social de uma nação. Todavia, é um setor que demanda muita energia oriunda de combustíveis fósseis gerando volumes considerados de gases do efeito estufa. Em 2016, o setor foi responsável por 29% das emissões de CO₂ no Brasil, sendo 90% desse total relativo ao modo rodoviário. Dada a importância do setor e seu potencial poluidor, este trabalho tem como finalidade avaliar o consumo energético e, conseqüentemente na emissão de CO₂ do modo rodoviário no Brasil. Para isso, o método *System Dynamics* (SD) foi escolhido. Inicialmente, as relações entre frota de veículos, PIB (global e do setor de transporte) e investimentos em infraestrutura rodoviária (extensão de vias) foram estruturadas por meio de um diagrama de causa e efeito e posteriormente elaborado um diagrama de estoque e fluxo. Com o modelo proposto, foram estabelecidos 15 cenários, os quais foram avaliados em um horizonte de onze anos, compreendidos entre 2016 e 2026, sob diferentes perspectivas. Os resultados evidenciaram que a variação da frota de veículos rodoviários tem maior influência no consumo energético e, conseqüentemente, nas emissões de CO₂, quando comparado com a composição de uso de combustíveis e investimentos em pavimentações de vias. A variável de intensidade energética teve a maior variação nos cenários avaliados. Esse dado mostra que há um ganho significativo em aumentar a produtividade do setor em comparação à redução de emissões ocasionadas pela diminuição da frota de veículos. Diante do exposto, tornar o uso de energia mais eficiente no setor de transporte, mais especificamente no modo rodoviário, é um problema que precisa ser amplamente discutido, dado sua significativa contribuição econômica e seu impacto ambiental no desenvolvimento de um país. Isso se intensifica em nações em que o modo rodoviário possui grande representatividade como no caso do Brasil, em que este modo representa 60% na matriz de transporte

Palavras-chave: Consumo Energético; Emissão de CO₂; Setor de Transporte; Modo Rodoviário.

ABSTRACT

The transportation sector is a key sector for the development of a country, since it is a support for the economic and social development of a nation. However, it is a sector that has a large amount of energy from fossil fuels that generate volumes considered as greenhouse gases. In 2016, the sector was responsible for 29% of CO₂ emissions in Brazil, 90% of this total being related to road mode. Given the importance of the sector and its polluting potential, this work aims at the energy consumption and, consequently, the CO₂ emission of the road way in Brazil. For this, the System Dynamics (SD) method was chosen. Initially, relations between markets, GDP (global and transportation sector) and investments in road (road extension) were structured through a cause and effect diagram and then elaborated by a stock and flow diagram. With the proposed model, 15 scenarios were defined, among which were evaluated over a eleven year horizon, between 2016 and 2026, from various perspectives. The effects show that the variation of the road vehicles has a greater influence on the energy consumption and, consequently, the CO₂ emissions, when compared to the composition of fuel use and investments in road paving. A. This indicator showed that there is a significant gain in increasing the productivity of the sector in relation to the reduction of sales caused by the increase of the fleet of vehicles. In view of the above, becoming a more efficient energy object, a transportation sector, is more a road case, it is a problem that can be discussed, have a greater probability of economy and its environmental impact without the development of a country, mainly in nations What to do as this view represents 60% in the transport matrix.

Keywords: Energy Consumption; Emission of CO₂; Transportation Sector; Road Mode.

Índices de Figuras

Figura 1 - Variação acumulada do PIB brasileiro e o do setor de transporte no Brasil – 1996 a 2016 (%).	21
Figura 2 - Exemplo de <i>loop</i> do diagrama de causa e efeito	31
Figura 3 – Diagrama estoque e fluxo	32
Figura 4 - Processo de modelagem da dinâmica de sistemas	36
Figura 5 – Relação entre crescimento econômico e investimentos em infraestrutura de transporte.	48
Figura 6 – Relações entre crescimento econômico, frota de veículos e emissão de CO ₂ .	48
Figura 7 – Relações entre crescimento econômico, frota de veículos, consumo de energia e emissão de CO ₂ .	49
Figura 8 – Relações entre investimento em infraestrutura de transporte, consumo de energia, emissão de CO ₂ e crescimento econômico.	49
Figura 9 - Relações entre investimento em infraestrutura de transporte, consumo de energia, emissão de CO ₂ , valor adicionado pelo transporte e crescimento econômico.	50
Figura 10: Diagrama de causa e efeito.	50
Figura 11 – Variáveis de entrada e saída do modelo.	52
Figura 12 – Relações não consideradas no diagrama de estoque e fluxo (em vermelho)	53
Figura 13 - Diagrama de causa e efeito submodelo A	54
Figura 14 - Diagrama de estoque e fluxo submodelo B	56
Figura 15 – Diagrama estoque e fluxo submodelo C.	60
Figura 16 - Diagrama de Estoque e Fluxo submodelo D.	62

Figura 17 – Modelo proposto.....	64
----------------------------------	----

Índices de Gráficos

Gráfico 1 – Teste consistência física estoque de infraestrutura.	70
Gráfico 2 - Comportamento da CO ₂ emitido pelo modo entre 2000 e 2016 para diferentes <i>times steps</i>	72
Gráfico 3 – Teste condição extrema influência sob o estoque CO ₂ e consumo energético.....	73
Gráfico 4 – Teste relação entre variação anual acumulada da movimentação de carga e PIB no Brasil no período de 2013 a 2017.....	76
Gráfico 5 – Comparativo entre os dados reais e simulação da emissão de CO ₂ do modo rodoviário.....	77
Gráfico 6 – Comparativo entre os dados reais e simulação do consumo energético do modo rodoviário.	78
Gráfico 7 – Teste adequação estoque infraestrutura.	79
Gráfico 8 - Comparativo entre os dados reais e simulação da infraestrutura do modo rodoviário.....	79
Gráfico 9– Comportamento infraestrutura nos cenários base, 1, 2 e pessimista.	85
Gráfico 10 – Comportamento Emissão de CO ₂ nos cenários base, 1, 2 e pessimista.	86
Gráfico 11 – Comportamento Consumo Energético nos Cenários base, 1, 2 e pessimista.	87
Gráfico 12 – Intensidade Energética para os Cenários base, 1, 2 e pessimista.	88
Gráfico 13 – Comportamento Infraestrutura nos Cenários base, 3 e 4.	89

Gráfico 14 – Comportamento emissão de CO ₂ nos Cenários base, 3 e 4.	90
Gráfico 15 - Comportamento consumo energético nos Cenários base, 3 e 4. .	90
Gráfico 16 - Variações nos Investimentos em Pavimentações de Rodovias dos Cenários de base, 5 e 6.	92
Gráfico 17 - Comportamento emissão de CO ₂ e consumo energético nos Cenários base, 5 e 6.	92
Gráfico 18 – Comportamento infraestrutura Cenários Base, 7 e 8.....	93
Gráfico 19 – Comportamento emissão de CO ₂ nos Cenários 7 e 8.	94
Gráfico 20 – Comportamento consumo energético Cenários 7 e 8.....	95
Gráfico 21 – Comportamento intensidade energética Cenários base, 7 e 8. ...	95
Gráfico 22 – Comportamento emissão de CO ₂ nos Cenários base, 9 e 10.....	97
Gráfico 23 – Comportamento consumo energético nos Cenários base, 9 e 10.	97
Gráfico 24 – Comportamento intensidade energética Cenários base, 9 e 10 ..	98
Gráfico 25 – Comportamento Intensidade Energética nos Cenários base, 11, 12 e 13.	98

Índice de Quadros

Quadro 1 - Processo de modelagem da dinâmica de sistemas	35
Quadro 2 - 24 testes agrupados em 5 categorias.	40
Quadro 3 – Descrição dos feedbacks do diagrama de causa e efeito	51
Quadro 4 - Fatores de equivalência de veículos	66
Quadro 5 – Variação anual de veículos Cenário 15	83
Quadro 6 – Valores PIB Brasil 2000 a 2016.....	125

Quadro 7 – Frota circulante brasileira 2000 a 2016 126

Quadro 8 – Porcentagem de utilização anual por tipo de combustível..... 126

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Valores de Infraestrutura em 2016 para diferentes intervalos de tempo
..... 71

Tabela 2 - Teste correlação entre PIB e frota de veículos. 75

Tabela 3 – Resumo dos cenários propostos 84

Tabela 4 – Comparação cenários ano de 2026..... 100

Tabela 5 – Equacionamento das variáveis do modelo (continua) 119

Tabela 6 – Cenários Propostos para Variação do PIB, Investimento em
Infraestrutura Rodoviária e Investimentos em Pavimentação de Rodovia 127

Tabela 7 - Cenários Propostos para Frota, % de veículos por tipo de combustível,
valor adicionado do transporte e política B10..... 128

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Objetivo Geral e Específicos	17
1.2	Estrutura da Dissertação.....	18
2	O Modo de Transporte Rodoviário no Brasil	20
3	Relações entre PIB, Infraestrutura, Frota de Veículos, Emissões de CO ₂ e Consumo energético	23
4	Dinâmica de Sistemas Aplicada ao Setor de Transporte	27
5	Método de Pesquisa	29
5.1	O Processo de Modelagem.....	33
5.2	Teste do Modelo	36
6	Procedimento de pesquisa.....	41
6.1	Etapa 1: Identificação na literatura das relações entre as variáveis estudadas	41
6.2	Etapa 2: Formulação do Modelo	41
6.3	Etapa 3: Obtenção de parâmetros	42
6.4	Etapa 4: Testes	43
6.5	Etapa 5: Definição e Análise de Cenários	43
7	Formulação do Modelo.....	45
7.1	Diagrama de Causa e efeito.....	45
7.2	Diagrama de Estoque e Fluxo.....	52
7.2.1	Submodelo A: Variáveis de Cunho Econômico	53
7.2.2	Submodelo B: Infraestrutura Rodoviária.....	55

7.2.3	Submodelo C: Emissões de Dióxido de Carbono pelo Modo Rodoviário.....	59
7.2.4	Submodelo D: Consumo Energético do Modo Rodoviário.....	62
8	Obtenção de Parâmetros	65
8.1	Submodelo A.....	65
8.2	Submodelo B.....	66
8.3	Submodelo C	67
8.4	Submodelo D	68
9	Teste do Modelo	69
9.1	Teste de Conservação Física.....	69
9.2	Consistência Dimensional	70
9.3	Erro de Integração.....	71
9.4	Teste de Condições Extremas	72
9.5	Avaliação de Parâmetros	74
9.6	Teste Endógeno de Reprodução de Comportamento	76
9.7	Teste de Adequação de Limites.....	80
10	Cenários propostos	81
11	Resultados.....	84
11.1	Subgrupo 1: PIB.....	84
11.2	Subgrupo 2: Investimento em Infraestrutura	88
11.3	Subgrupo 3: Extensão de vias pavimentadas	91
11.4	Subgrupo 4: Frota de veículos	93
11.5	Subgrupo 5: Veículos por tipo de combustível	96

11.6	Subgrupo 6: Valor Adicionado pelo Transporte	98
11.7	Comparação entre cenários.....	99
12	Considerações finais	107
	Referências	110
	Apêndice A – Tabela de equações e variáveis do modelo.....	119
	Apêndice B – Parâmetros do Modelo.....	125
	Apêndice C – Cenários propostos.....	127

1 INTRODUÇÃO

O setor de transporte é um setor chave para o desenvolvimento de um país, uma vez que ele dá suporte para o desenvolvimento econômico e social de uma nação, possibilitando alocação eficiente de materiais e recursos, além de proporcionar mobilidade para a população. Saboori, Sapri e Baba (2014) afirmam que o alto nível de crescimento econômico, a rápida urbanização, o aumento da renda disponível, a diversificação das atividades sociais e de lazer, o rápido crescimento do número de veículos particulares e a distribuição desigual de materiais e recursos energéticos aumentam a demanda por transporte. Contudo, esse aumento da demanda traz consigo o aumento do impacto ambiental decorrente das atividades desse setor. O crescimento nos índices de emissão de gases do efeito estufa (GEE) proveniente do setor de transportes e sua participação nas emissões de dióxido de carbono (CO₂) está aumentando gradualmente em todas as regiões do mundo.

Metz (2007) projetou que o consumo mundial de energia para o setor de transporte cresça 2% por ano, sendo observadas maiores taxas em países emergentes. As emissões de CO₂ do setor de transporte estão crescendo mais rapidamente que as emissões totais desse gás. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2016), no período de 1990 a 2015, as emissões totais de CO₂ tiveram um crescimento de 13%. Em contrapartida, as emissões de CO₂ provenientes do setor de transporte tiveram um aumento de 68% no mesmo período. No ano de 2015, o setor de transporte respondeu por 24% das emissões totais de CO₂, sendo três quartos dessa emissão decorrentes de atividades do modo rodoviário.

No caso do Brasil, de 2007 a 2014, foi observado um significativo crescimento na utilização energética do setor, com maior crescimento em 2010: 10,9% em relação ao ano anterior (EPE; 2017). No ano de 2015 e 2016, houve um decréscimo de 2,10% e 1,06%, respectivamente, no uso de energia pelo setor, em função da crise econômica vivenciada no país.

Em termos de emissão de CO₂, o setor de transporte no Brasil acompanha o cenário mundial. Em 2016, o setor foi responsável por 29% das emissões de CO₂ no Brasil. Desse percentual, 90% é relativo ao modo rodoviário (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2017), sendo considerado o setor que mais impacta na qualidade do ar no país.

No Brasil, o modo rodoviário responde por 60% do transporte de passageiros e cargas, em contraste com 21% na China e 39% na Índia (RAISER *et al*, 2017). Por esse motivo, esse modo merece maior atenção no que diz respeito a suas atividades e impactos. Nesse sentido, o impacto ambiental do modo rodoviário, não é o único que merece atenção. Os investimentos em transporte no Brasil apresentam níveis muito inferiores ao que se espera para economias de alto a moderado crescimento. Em 2016, o investimento em infraestrutura rodoviária foi de 0,13% do PIB. Este valor é muito inferior ao necessário para manter as obras fundamentais para o modo de acordo com Frischtak e Mourão (2017). Segundo estes autores, deveriam ser investidos no mínimo 5,3% do PIB naquele ano para realizar projetos essenciais propostos.

Em 2017, apenas 20% das rodovias brasileiras eram pavimentadas. Por si só, este dado reflete baixa densidade de vias pavimentadas quando se considera a extensão territorial do país. Além disso, 61,8% dessas rodovias pavimentadas encontram-se em estado regular, ruim ou péssimo, o que impacta nos custos do setor e em maiores índices de acidentes, tornando-o menos eficiente (CNT, 2017).

Para De Oliveira (2018) essa situação é bastante problemática, considerando o impacto dessa condição no custo do frete no Brasil: ele encarece cerca de 50%, além de inviabilizar o transporte eficiente para o escoamento de mercadorias. Esse aumento no preço dificulta a produção de muitos produtos de maior valor agregado, além de encarecer os produtos que conseguem ser competitivos mesmo diante desse contexto. Adicionalmente, rodovias em condições ruins para o tráfego de veículos aumentam consideravelmente o número de acidentes, e as emissões de poluentes nocivos à saúde humana (DE OLIVEIRA, 2018).

Esse baixo nível de investimento é um problema ainda maior, pois é consenso que a influência da infraestrutura em quantidade insuficiente e qualidade inferior aos padrões internacionais, corrobora com a desaceleração do crescimento da economia brasileira (CAMPOS NETO, 2014). Essa relação pode ser ratificada no estudo realizado por Ferreira e Malliagros (1998), em que comprovam uma forte relação entre infraestrutura e o PIB no Brasil em longo prazo.

Adicionalmente, o desbalanceamento da matriz de transporte brasileira custa caro ao Brasil. Raiser *et al* (2017) aponta que caso o país sanasse as ineficiências de alocação na matriz multimodo de transportes e as ineficiências de operação no sistema de rodovias federais, seria possível economizar 1,4% do PIB, o que equivale a 2,2 vezes o investimento anual atual no setor de transportes. As ineficiências de alocação são estimadas a partir da quantificação da economia gerada para os usuários caso o transporte de bens fosse feito por ferrovias, ao invés de rodovias. Os benefícios da substituição de rodovias por ferrovias acumulariam rapidamente devido aos volumes de carga e às distâncias percorridas no Brasil. Uma estimativa superficial da economia anual no transporte de minérios sólidos a granel equivale a US\$ 11,8 bilhões (0,5% do PIB), com uma economia adicional de US\$ 4,7 bilhões para cargas agrícolas (RAISER *et al*, 2017).

Nesse contexto, alguns estudos buscaram identificar relações em longo e curto prazo entre infraestrutura, consumo de energia, e crescimento econômico no Brasil. Pao, Tsai (2010), utilizaram a metodologia de cointegração para avaliar a existência ou não de relações em longo e curto prazo das variáveis citadas dos países que compõem o BRIC. Em 2011, os mesmos autores utilizaram a técnica de análise de Multivariável de Granger para investigar relações causais entre emissão de CO₂, consumo de energia, investimento externo e PIB nos países participantes do BRIC (PAO; TSAI, 2011). Hossain (2011) utilizou metodologia econométrica para elaborar um painel de estimativa para emissões de CO₂, consumo de energia, crescimento econômico, abertura comercial e urbanização de países recém-industrializados, entre eles o Brasil. Todos os estudos citados

trataram as variáveis envolvidas de forma global, não sendo abordado nenhum setor específico.

Face as informações apresentadas sobre o setor de transporte e não havendo outros estudos que abordem as relações das variáveis apresentadas para o modo rodoviário, a seguinte questão é levantada: como o PIB, a extensão de vias pavimentadas, a frota de veículos se relacionam e interferem no consumo energético e emissões de CO₂ do modo rodoviário no Brasil?

Este trabalho busca relacionar por meio da dinâmica de sistemas os parâmetros citados para o caso do Brasil. Abbas e Bell (1994) e Shepherd (2014) explicam que a dinâmica de sistemas fornece um quadro estruturado por meio do qual sistemas de grande escala, tais como sistemas de transporte, podem ser facilmente modelados, analisados e testados.

Abbas e Bell (1994) esclarecem ainda que o planejamento de transporte requer visão abrangente e holística, em que os *feedbacks* entre o transporte e outros setores são considerados. Esse requisito ignora a totalidade dos impactos que os sistemas de transporte podem ter em seus ambientes. Assim, a abordagem de dinâmica do sistema pode atuar como uma plataforma comum para modelagem de transporte e outros setores relacionados.

1.1 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS

Perante o problema exposto, este trabalho tem como finalidade propor um modelo para demonstrar como o crescimento econômico, extensão de vias pavimentadas e a frota de veículos impactam nas emissões de CO₂ e no consumo energético do setor de transporte no Brasil. Para isso, uma simulação utilizando o método de Dinâmica de Sistemas foi proposta.

Como objetivos específicos determina-se:

1. Identificar na literatura as relações entre as variáveis: emissão de CO₂, consumo energético, investimentos em infraestrutura rodoviária e desempenho econômico e frota de veículos;
2. Relacionar as variáveis em um diagrama de causa e efeito;
3. Equacionar as variáveis descritas no diagrama de estoque e fluxo, baseando-se no método de Dinâmica de Sistemas.
4. Obter os parâmetros necessários para inserção no modelo.
5. Testar e simular o modelo proposto nos cenários propostos

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este estudo está dividido em 12 capítulos. No Capítulo 1, apresenta-se a introdução que discorre sobre o panorama geral do estudo e os objetivos, geral e específicos.

No Capítulo 2, 3 e 4 são realizadas considerações acerca da dinâmica de sistemas aplicada a transporte, bem como uma revisão de estudos passados que avaliaram a relação dos fatores avaliados no presente trabalho.

O Capítulo 5 apresenta os procedimentos metodológicos utilizado para a realização desta pesquisa, enquanto o Capítulo 6 detalha os procedimentos de pesquisa.

No Capítulo 7 é mostrado o modelo proposto, contendo a identificação das variáveis do problema e a formulação de diagramas, de forma a representar a relação entre essas variáveis e o equacionamento matemático realizado. Os parâmetros dessas equações são apresentados no Capítulo 8, bem como a forma de obtenção dos mesmos.

O Capítulo 9 apresenta os testes de confiabilidade do modelo. No Capítulo 10 são mostrados os cenários simulados, cujos resultados são apresentados e discutidos no Capítulo 11.

Por último, o Capítulo 12 apresenta a conclusão da pesquisa, com a avaliação de cumprimento dos objetivos propostos e resultados obtidos, além de recomendações para trabalhos futuros.

2 O MODO DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO NO BRASIL

A matriz de transporte no Brasil é predominantemente rodoviária. Aproximadamente 96,2% do transporte de passageiros e 61,8% do transporte de cargas são realizados por meio do modo rodoviário (CNT, 2017).

Essa dependência começou a ser desenhada no início da década de 30, momento em que a malha rodoviária recebeu grandes investimentos que viabilizaram sua rápida expansão, devido ao incentivo de desenvolvimento das regiões do interior do País. Nas décadas de 50 e 60, com a vinda da indústria automobilística, a política de desenvolvimento assumida estava praticamente estabelecida para o modal rodoviário. Por oferecer rapidez e agilidade, possibilitando coletas e entregas de mercadorias nas regiões mais distantes, o modo rodoviário passou então a predominar no transporte do Brasil (CNT, 2006).

A permanência do uso desse modo no Brasil pode ser explicada pelos custos relativos de construção das vias - que é inferior quando comprado ao modo ferroviário e superior se comparado com o modo hidroviário - e pelo foco de curto prazo dos planejamentos de transporte no país. Por meio do modo de transporte rodoviário é possível transportar produtos acabados e semiacabados por curtas e médias distâncias, com possibilidade de mover menor quantidade de carga por unidade de energia consumida. Contudo, apresenta preços médios de frete mais elevados que os modais ferroviário e hidroviário (tornando-o apto para o transporte de mercadorias de valor mais agregado ou perecíveis) (IPEA, 2016).

Como vantagens desse modo, pode-se citar: a possibilidade de se ter a frota “rastreada” permite implantação de processos logísticos *just-in-time* (redução de estoques nas fábricas e esperas em pátios modais e portos); muita flexibilidade, facilidade de integração no transporte porta a porta e adequação aos tempos demandados e frequência e disponibilidade dos serviços (IPEA, 2016).

Por outro lado, esse modo apresenta custos variáveis elevados por não transportar grandes volumes em uma única vez, como aponta o estudo de Eller, Souza Junior e Curi (2011), cujos autores afirmam que o modo ferroviário se

mostra mais eficiente em relação ao modo rodoviário, quando se consideram os custos de médio e longo prazos, principalmente os custos externos, uma vez que os custos ambientais são expressivamente maiores no segundo modo.

Em termos econômicos, o setor contribui diretamente para a agregação de valor da produção nacional ao ofertar serviços de transporte. De forma indireta, a prestação de serviço viabiliza a interação do mercado e estimula a realização de novos negócios que auxiliam para formação do PIB (CNT, 2017). O desenvolvimento do setor de transporte está intimamente relacionado ao desempenho da economia do país, principalmente com a variação anual do PIB (Figura 1).

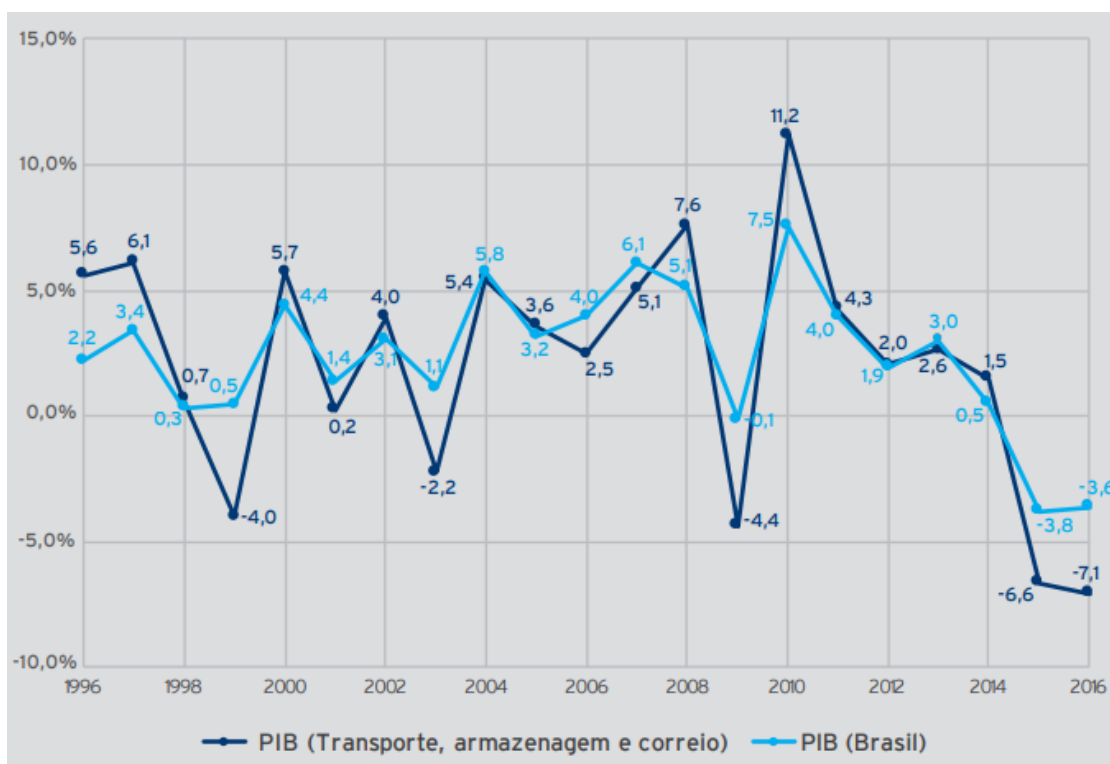


Figura 1 - Variação acumulada do PIB brasileiro e o do setor de transporte no Brasil – 1996 a 2016 (%).
Fonte: CNT (2017, p.11).

Em termos de emissões de CO₂ e com base no Plano Setorial de Transporte e de Mobilidade Urbana para Mitigação da Mudança do Clima – PSTM, a estimativa é de que o setor de energia, no qual o transporte está inserido,

continue sendo o segundo maior emissor de GEEs, aumentando de 15% em 2005 para 27% em 2020 sua participação. Este aumento ocorrerá principalmente no modal rodoviário de cargas. A emissão de CO₂ para o transporte de cargas, segundo perspectivas, terá um aumento de 42% a 46,3% em 2020, em relação ao ano de 2010. Nas próximas décadas a maior parte do transporte de cargas permanecerá sendo realizada pelo modal rodoviário, mesmo com a redistribuição da matriz de transporte, e com o uso intensivo de combustíveis fósseis. Estima-se que em 2020 a frota de caminhões será responsável por 70,2% do consumo de óleo diesel no modal rodoviário (Brasil, 2013).

Diante desse cenário e para melhor entendimento, no próximo capítulo será feito um levantamento bibliográfico para verificar a relação entre PIB, extensão de vias, frota de veículos, consumo energético e emissões de CO₂.

3 RELAÇÕES ENTRE PIB, INFRAESTRUTURA, FROTA DE VEÍCULOS, EMISSÕES DE CO₂ E CONSUMO ENERGÉTICO

O desenvolvimento econômico está intimamente relacionado ao consumo de energia, uma vez que mais consumo de energia leva a um maior desenvolvimento econômico por meio do aumento da produtividade. No entanto, também é igualmente provável que o uso mais eficiente da energia, que poderia resultar em uma redução no consumo energético, possa exigir um nível mais alto de desenvolvimento econômico. Ou seja, um melhor desempenho econômico pode ser um catalisador para a eficiência energética (ANG, 2007).

Preocupações crescentes sobre o meio ambiente despertaram a atenção dos formuladores de políticas, para identificar os determinantes das poluições ambientais e a direção de sua influência (HATZIGEORGIOU; POLATIDIS; HARALAMBOPOULOS, 2011; WANG *et al*, 2011, GHOSH, 2010). Entre as variáveis mais importantes associadas à degradação ambiental estão o consumo de energia e os objetivos de desenvolvimento econômico que um país persegue em detrimento do meio ambiente. Embora isso tenha se traduzido na identificação dos determinantes das poluições ambientais, a maioria dos estudos limitaram sua análise apenas ligando o consumo total de energia e o crescimento econômico à poluição ambiental, particularmente as emissões de CO₂. Só o consumo de energia e o crescimento podem não explicar as emissões de CO₂ (OZTURK; ACARAVCI, 2013). Devido ao crescimento econômico e combustão de combustíveis fósseis, as emissões de poluentes aumentaram progressivamente, exigindo atenção urgente de estudiosos e formuladores de políticas para identificar suas fontes além do escopo do uso total de energia (LEAN; SMYTH, 2010).

Fodha e Zaghdoud (2010) investigaram a relação entre o crescimento econômico e as emissões de CO₂ para a Tunísia no período de 1961 a 2004. Os resultados da causalidade mostraram que existe uma relação unidirecional que vai do crescimento econômico à poluição, tanto no curto como no longo prazo. No caso da África do Sul, Menyah e Wolde-Rufael (2010) examinaram a relação

entre crescimento econômico, emissões de CO₂ e consumo de energia para o período 1965-2006. O resultado do teste de causalidade de Granger mostraram uma relação unidirecional entre as emissões de CO₂ e o PIB; do consumo de energia ao PIB e do consumo de energia às emissões de CO₂.

Em uma análise empírica, Halicioğlu (2009) investigou a relação causal entre as emissões de CO₂ e o crescimento econômico da Turquia empregando uma abordagem de análise da cointegração entre as variáveis e modelos autorregressivos de defasagens distribuídas (ARDL) no período de 1960-2005. Suas descobertas confirmaram a hipótese de *feedback* tanto no curto como no longo prazo. Usando a abordagem de teste de limites ARDL complementada por Johansen-Juselius, Ghosh (2010) mostrou que existe uma causalidade de curto prazo bidirecional entre as emissões de CO₂ e o crescimento econômico na Índia durante 1971–2006. Wang *et al* (2011) usaram o modelo de correção de erros para verificar a relação causal entre as emissões de CO₂ e o crescimento econômico de 138 países durante o período de 1971 a 2007, e encontra evidências para apoiar a hipótese de *feedback*.

Alguns estudos, como Pao e Tsai (2010) examinaram relações causais dinâmicas entre emissões de poluentes, consumo de energia e produção para um painel de países do BRIC durante o período de 1971 a 2005, em que o Brasil está incluso. Os resultados de causalidade do painel indicaram que há relação forte de causalidade bidirecional entre consumo de energia e emissões, porém o estudo não fornece uma visão sistêmica do problema.

Os mesmos autores, utilizando o método de causalidade multivariável de Granger abordaram o impacto do crescimento econômico e do desenvolvimento financeiro na degradação ambiental usando uma técnica de cointegração de painel para o período entre 1980 e 2007 para países pertencentes ao BRIC, grupo no qual o Brasil faz parte. Os resultados mostraram que os países que compõem o BRIC são dependentes de energia, assim devem adotar métodos de gerenciar tanto a demanda de energia quanto o investimento estrangeiro direto e aumentar o investimento no fornecimento de energia e eficiência energética

para reduzir as emissões de CO₂, sem comprometer a competitividade (PAO; TSAI, 2011).

Hossain (2011) examinou empiricamente as relações causais entre as emissões de dióxido de carbono, consumo de energia, crescimento econômico, abertura comercial e urbanização para o painel de países recentemente industrializados, entre eles o Brasil. Como resultado, verificou-se que não há evidência de relação causal de longo prazo, mas há relação causal unidirecional de curto prazo do crescimento econômico e abertura comercial às emissões de dióxido de carbono, do crescimento econômico ao consumo de energia, da abertura comercial à economia crescimento, da urbanização ao crescimento econômico e da abertura comercial à urbanização.

Azlina, Law e Mustapha (2014) utilizaram a dinâmica de sistemas para criar um modelo que identifica a relação entre renda, consumo de energia e emissão de CO₂ na Malásia no período de 1975 a 2011. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que há uma relação causal em longo prazo entre as três variáveis abordadas. Os resultados foram comparados com alguns métodos econométricos que avaliam as relações causais, como a curva de Kuznet, para validar o método de dinâmica de sistemas.

Amann *et. al.* (2016) investigaram a relação entre crescimento e gastos em infraestrutura no contexto brasileiro e a natureza e causas do subinvestimento em infraestrutura com foco no setor de transporte urbano. Nesse estudo, chegaram a conclusão que uma razão central para o *défict* de infraestrutura existente, está associado a problemas com o projeto e implementação regulatória.

Conforme exposto, no caso do Brasil não há estudos que analisam de forma sistêmica todas as inter-relações existentes entre os fatores acima citados e como eles se comportam em diferentes cenários ao longo do tempo. Todos os estudos apresentados buscaram indentificar as relações diretas entre esses fatores, por meio de métodos estatísticos que não avaliam o comportamento

dinâmico das variáveis. Dessa forma, o propósito desse estudo é preencher essa lacuna existente na literatura.

4 DINÂMICA DE SISTEMAS APLICADA AO SETOR DE TRANSPORTE

A dinâmica de sistemas é um método que busca melhorar o aprendizado em sistemas complexos e está relacionada diretamente com o pensamento sistêmico (STERMAN, 2000). Segundo Aslani *et al* (2014), a dinâmica de sistemas pode ser utilizada para desenvolver sistemas complexos, em que todos os estágios estão inter-relacionados e apresentam uma relação de *feedback* para compreensão do sistema.

Para o setor de transportes, a aplicabilidade da dinâmica de sistemas foi discutida por Abbas e Bell (1994) que listaram pontos fortes e fracos do método. Foi sugerida a utilização do método para demandas estratégicas, podendo ser uma ferramenta útil para apoiar a análise de políticas e a tomada de decisões em transportes.

Shepherd (2014) realizou um estudo de revisão de artigos baseados em dinâmica de sistemas em que caracterizou o método por área de aplicação do setor de transportes, como a aceitação de veículos de combustível alternativo, gerenciamento de cadeia de suprimentos que interferem no transporte, manutenção rodoviária, política estratégica, infraestrutura aeroportuária e ciclos econômicos da companhia aérea.

Jifeng, Huapu e Hu (2008) utilizaram o método de dinâmica de sistemas para desenvolver um sistema de transporte urbano. O modelo desenvolvido pelos autores aborda as relações dinâmicas entre população, desenvolvimento econômico, número de veículos, meio ambiente, demanda por viagens, transporte. A partir disso, os autores selecionaram o número de veículos como variável chave para análise e simularam o modelo com dados da China a partir de diferentes cenários de desenvolvimento urbano.

Diaz, Behr e Ng (2016) desenvolveram um modelo utilizando o método de dinâmica de sistemas, cujo objetivo era determinar o comportamento das relações cíclicas entre investimento em infraestrutura, crescimento econômico e congestionamento na Virgínia (EUA) a fim de auxiliar a tomada de decisão para

novos projetos de investimento em infraestrutura. Eles chegaram à conclusão que com o aumento do investimento em infraestrutura, novas vagas de empregos são ofertadas na região, elevando assim a renda per capita do local. Contudo, com o aumento da renda na região, a atratividade para migrações locais aumentam, o que eleva o nível de congestionamento. Com o aumento do congestionamento, a produtividade é reduzida, o que apresenta um impacto negativo no crescimento econômico.

Para o Brasil, não foi encontrado nenhum estudo que relacionasse as variáveis emissão de CO₂, consumo energético, PIB, extensão de vias e frota de veículos no contexto do setor de transporte, mais especificadamente para o modo rodoviário. A pesquisa foi feita nos Periódicos Capes em abril de 2018, utilizando as palavras-chave emissão de CO₂, PIB, modo rodoviário, em português. As palavras chaves utilizadas pela busca nos periódicos em inglês foram *CO₂ emission, GDP, transport sector*.

5 MÉTODO DE PESQUISA

A dinâmica de sistemas é usada para o entendimento de sistemas complexos cujas variáveis interajam entre si. Em outras palavras, as variáveis não são definidas como um conceito direto de variável dependente e independente. Ao contrário de outras formas de simulação, as quais por diversas vezes tem-se variáveis dependentes ou independentes - na dinâmica de sistema, as variáveis interagem constantemente entre si. Em pesquisas de cunho acadêmico, essa metodologia vem sendo utilizada para a modelagem de ambientes de negócios, de cadeias de produção e suprimentos e de sistemas sociais complexos, onde há interatividade constante dos seus agentes (RICHARDSON, 1996; STERMAN, 2000).

A simulação por dinâmica de sistemas (DS) caracteriza-se pela análise das características de respostas sobre decisões tomadas em sistemas sociais para demonstrar como estruturas organizacionais e atrasos interagem influenciando no comportamento desses sistemas. As aplicações desta abordagem variam desde cadeia de suprimentos até sistemas urbanos, econômicos e ecossistemas. Os modelos de dinâmica de sistemas são representados por níveis, fluxos entre estes níveis e informações que determinam a magnitude destes fluxos. Nesta abordagem as entidades e eventos singulares são abstraídos e agregados em políticas e variáveis globais. As variáveis, ao contrário do que ocorre na simulação de eventos discretos, são consideradas contínuas, o que em muitos casos, como no de fluxo de materiais na cadeia de suprimentos, é uma aproximação da realidade. Porém, ela é válida devido ao nível de agregação que se utiliza nos problemas estudados, não prejudicando as observações (STERMAN, 2000).

Fernandes (2003) explica que em DS é possível representar um sistema por meio de abordagens qualitativa e quantitativa. A modelagem qualitativa proporciona um maior entendimento a respeito das relações das variáveis do sistema, enquanto a quantitativa trabalha com análises numéricas. As duas

abordagens são trabalhadas em conjunto para a representação de um modelo que seja próximo à realidade da dinâmica do sistema (NAIM; TOWILL, 1994).

A fase qualitativa tem início com a identificação do sistema, seu alcance e interfaces, ou seja, limita-se o sistema e o objetivo do estudo, bem como as variáveis de entrada e saída do modelo. A partir de então, o modelo conceitual é construído por meio do Diagrama de Causa e Efeito (DCE), o qual ilustra a relação causal entre as variáveis identificadas, auxiliando como rascunho preliminar de hipóteses causais e simplificando a representação do modelo (GEORGIADIS; VLACHOS, 2004; NAIM; TOWILL, 1994).

Os elementos básicos de um DCE são variáveis relacionadas por meio de setas de sinal negativo ou positivo, representando uma relação causal. Uma relação positiva, ou diretamente proporcional significa que, se a causa aumentar, o efeito aumenta, ou, se a causa diminuir, o efeito diminui. Uma relação negativa, ou inversamente proporcional, significa que, se a causa aumentar, o efeito diminui; se a causa diminuir, o efeito aumenta (STERMAN, 2000).

Além das variáveis relacionadas por meio de setas, esses diagramas são caracterizados por laços de realimentação de polaridade positiva ou negativa, representados por ciclos no sentido horário ou anti-horário com sinais (+) ou (-) (FORRESTER, 1985). Um laço de realimentação é uma sucessão de causas e efeitos tais que, uma mudança em uma dada variável repercute através do laço e torna a afetar a mesma variável (MORECROFT, 2015). Segundo Georgiadis e Vlachos (2004), se um aumento na variável inicial provoca, através do laço, um aumento final na mesma variável, então o laço de realimentação é considerado positivo. Ao contrário, se um aumento em uma dada variável inicial afeta o laço de modo a diminuir o valor dessa mesma variável, então o laço de realimentação é identificado como negativo. De acordo com Sterman (2000), esse método de determinação da polaridade do laço funciona independentemente da quantidade de variáveis existentes no laço e de qual seja a variável inicial do efeito, levando ao mesmo resultado.

Vale destacar que laços positivos tendem a provocar um crescimento exponencial instável e a um colapso no comportamento do sistema, enquanto laços negativos tendem a estabilizar o comportamento do sistema, mantendo-o em equilíbrio (GEORGIADIS; VLACHOS, 2004).

A Figura 2 ilustra um exemplo de relação entre as variáveis em um diagrama de causa e efeito e os laços de realimentação com suas respectivas polaridades. A interpretação dada para a Figura 2 é a seguinte: se aumenta a quantidade de dinheiro investido no banco, conseqüentemente aumenta-se o retorno do investimento, sendo o contrário verdadeiro, ou seja, se há um acréscimo no retorno do investimento, há um acréscimo também de dinheiro investido no banco, o mesmo ocorre caso seja feita uma análise de decréscimo para ambas variáveis. Dessa forma, tem-se uma relação diretamente proporcional, portanto ambas setas recebem sinais positivos e o ciclo também formado entre elas também deve ser sinalizado com sinal positivo. Por sua vez, a analogia entre as variáveis *população em certa região* e *emigração* apresenta uma relação inversamente proporcional. À medida que cresce a emigração, a população local diminui, ou, à medida que diminui a emigração, há um crescimento na população em certa região e vice-versa. Conseqüentemente, o ciclo formado por essas variáveis possui sinal negativo, uma vez que um aumento inicial na variável emigração, por exemplo, diminui a população e no final também diminuirá o valor dessa mesma variável, visto que haverá uma quantidade menor de pessoas para emigrarem.



Figura 2 - Exemplo de *loop* do diagrama de causa e efeito
Fonte: Carvalho (2008, p.4)

No entanto, os diagramas de causa e efeito não diferenciam as acumulações dos recursos e as taxas de mudança dos recursos em um sistema, ou seja, estoques e fluxos (STERMAN, 2000). Por isso, utiliza-se uma forma mais completa de representação dos sistemas, os Diagramas de Estoque e Fluxo (DEF), construídos com basicamente quatro componentes: estoques, fluxos, auxiliares e conectores, representados na Figura 3.

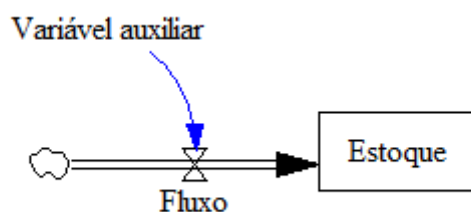


Figura 3 – Diagrama estoque e fluxo
Fonte: Elaborado pela autora

Os Diagramas de Estoque e Fluxo são baseados na matemática diferencial e na construção de sistemas de equações diferenciais. Os sistemas de equações – que são resolvidas por softwares – são compostos por variáveis que representam a acumulação no sistema (denominado estoques), os fluxos (que alimentam e vazam os estoques) e variáveis auxiliares. Em termos matemáticos, o estoque representa a resolução de uma equação diferencial dentro do sistema de equações (STERMAN, 2000).

Os fluxos são variáveis de ação que alteram os estoques, aumentando ou diminuindo seus volumes. Devem ser representados por setas com válvulas, que controlam as taxas de entrada e saída dos estoques. As nuvens, que podem aparecer no início ou final de cada fluxo, representam a fonte ou destino final e não são considerados por estarem fora do sistema delimitado de estudo (STERMAN, 2000).

As variáveis auxiliares têm a função de formular os dados e definir as equações dos fluxos, combinando, por meio de operações matemáticas, os fluxos, estoques e outros auxiliares. Podem aparecer, de forma repetida, entre os

símbolos “<” e “>”, para evitar o cruzamento excessivo de setas (MORECROFT, 2015).

Por fim, os conectores (setas) representam as inter-relações entre todos os componentes do sistema. São essas inter-relações que ligam os componentes que formarão uma expressão matemática (RICHARDSON, 1986).

5.1 O PROCESSO DE MODELAGEM

Sterman (2000) propõe um processo de modelagem iterativo composto por cinco passos para criar modelos de Dinâmica de Sistemas (Quadro 1). O primeiro passo, é a “Definição do problema”, é o passo mais importante na modelagem, em que o objetivo deve ser definido de forma clara. Ainda nessa etapa, deve-se identificar as variáveis-chave e conceitos, determinar o horizonte de tempo e caracterizar o problema de forma dinâmica para a compreensão e elaboração de políticas para resolvê-lo (SURYANI et al., 2010).

Assim que o problema for identificado e caracterizado ao longo de um horizonte de tempo adequado, inicia-se o segundo passo, “A Formulação da Hipótese Dinâmica”, a qual deve-se procurar quais teorias podem explicar o problema estudado. Nesta etapa, é necessário desenvolver mapas de estruturas causais baseados nas hipóteses desenvolvidas inicialmente, ou seja, o diagrama de causa e efeito (GEORGIADIS; VLACHOS, 2004).

A “Estruturação do modelo de simulação” é o terceiro passo proposto por Sterman (2000), em que a hipótese dinâmica é transformada em um diagrama de processos, onde virá especificado as estruturas e regras de decisão. Nesse passo são definidos os parâmetros, os relacionamentos entre eles, e as condições iniciais necessárias.

O quarto passo é o “Teste” o qual tem como objetivo comparar o modelo com modos de referência. Essa fase começa assim que a primeira equação é descrita e só encerra quando o modelo está em acordo com o seu propósito (STERMAN, 2000). São testadas a consistência do modelo e a sensibilidade, ou seja, como

o modelo reage a incertezas nos parâmetros, nas condições iniciais, nos limites e nas agregações.

Segundo Morecroft (2015), após ser obtida confiança na estrutura e comportamento do modelo, avança-se para o último passo do processo de modelagem, “Projeto e Avaliação de Políticas”. A criação de políticas é muito mais do que mudar os valores dos parâmetros, inclui a criação de novas estratégias, estruturas e regras de decisão. Devem ser analisadas as políticas por meio de uma análise de sensibilidade, com o intuito de verificar quão robustas são as recomendações da política sobre os cenários distintos e as incertezas conhecidas. As interações das diferentes políticas também devem ser levadas em consideração, visto que os sistemas reais são altamente não-lineares e, conseqüentemente, o impacto da combinação de políticas geralmente não é a soma de seus impactos sozinho (STERMAN, 2000).

Quadro 1 - Processo de modelagem da dinâmica de sistemas

Passos da Modelagem	Atividades	Questões
1 - Delimitação do problema	Seleção da ideia central	Qual o problema? Porque é um problema?
	Variáveis-chave	Quais as variáveis-chave e os conceitos a se considerar?
	Horizonte Temporal	Qual o tempo futuro a se considerar? QU dados históricos podem ser utilizados para fundamentar o problema?
	Definição do problema dinâmico (modos de referência)	Qual o comportamento histórico dos conceitos-chave e das variáveis? Qual o comportamento futuro esperado?
2 - Formulação da hipótese dinâmica	Geração da hipótese inicial	Que teorias podem explicar o tema?
	Foco interno	Formular uma hipótese dinâmica que explique dinâmica como consequência interna das estruturas de <i>feedback</i>
	Mapeamento	Desenvolver mapas de estruturas causais baseadas nas hipóteses iniciais, variáveis-chave, modos de referência e outros dados disponíveis
3 - Estruturação do modelo de simulação	Estrutura do modelo	Especificar as estruturas e regras de decisão
	Parametrização e estimação	Estimas os parâmetros, relacionamentos comportamentais e condições iniciais
	Teste	Testar a consistência com as proposições iniciais e limites estabelecidos
4 - Testes	Comparar com modos de referência	O modelo imita o comportamento previsto de forma adequada?
	Consistência	Quando testado em condições extremas, o modelo reage de modo a imitar a realidade?
	Sensibilidade	Como o modelo reage a incertezas nos parâmetros, nas condições iniciais, nos limites e nas agregações?
5 - Projeto e avaliação de políticas	Especificação de cenários	Que condições ambientais podem surgir?
	Projeto de políticas	Quais novas regras de decisão, estratégias e estruturas podem ser experimentadas no mundo real? Como podem ser representadas no modelo?
	Análise "se-então"	Quais os efeitos da política?
	Análise de sensibilidade	Quão robustas são as recomendações da política sobre cenários distintos e incertezas conhecidas?
	Interações entre políticas	As políticas interagem? São sinergias ou respostas compensatórias?

Fonte: Adaptado de Sterman (2000, p. 86).

A modelagem é um processo de *feedback*, não uma seqüência linear de etapas. Os modelos passam por constante iteração, diversos questionamentos, testes e

refinamentos. A Figura 4 reformula o processo de modelagem explicado no Quadro 1, criando um ciclo iterativo. A finalidade inicial é determinar o limite e o alcance do esforço de modelagem, porém o que é estudado com o processo de modelagem pode alterar a compreensão básica do problema e a finalidade do esforço realizado. A iteração pode ocorrer de qualquer passo para qualquer outro passo. Vale destacar que em qualquer modelagem, essas etapas serão repetidas diversas vezes, visto que a modelagem está inserida em um ciclo maior de aprendizagem (STERMAN, 2000).

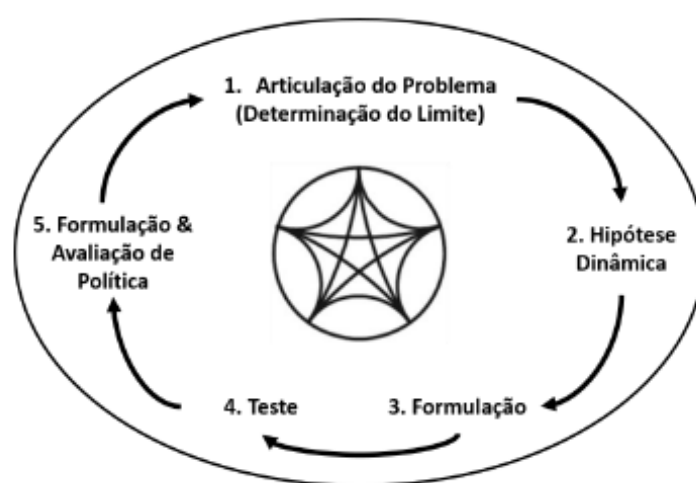


Figura 4 - Processo de modelagem da dinâmica de sistemas
Fonte: Adaptada de Sterman (2000, p. 87)

5.2 TESTE DO MODELO

O modelo de simulação em Dinâmica de Sistemas é uma representação abstrata do sistema real, sendo necessária a realização de testes para verificar se há correspondência entre o modelo que foi proposto e o real. Portanto, a verificação da utilidade do modelo é o processo que determina se o modelo é uma boa representação do sistema, se é confiável, robusto e aplicável à realidade (MULA et al., 2013).

Forrest (1985) explica que existe uma ampla variedade de testes específicos para descobrir falhas e modelos de melhoria. Organizados em duas categorias: testes de estrutura do modelo e teste de comportamento. Saisel e Hekimoğlu

(2013) explicam que o teste da estrutura verifica a consistência interna e a suficiência dos elementos formais do modelo para análise de um conjunto de problemas dinâmicos escolhidos. O teste do comportamento busca a combinação de padrões entre dados históricos e os resultados da simulação do modelo (QUADRAT-ULLAH; SEONG, 2010).

A questão-chave no teste é verificar dois aspectos: primeiro, se o modelo é apropriado para o uso ansiado, ou seja, o modelo reproduz o mundo real suficientemente bem para o propósito declarado (FORRESTER, 1985; SENGE; FORRESTER, 1980); e segundo, quanta confiança colocar em inferências baseadas em modelos sobre o sistema real (BARLAS, 1996).

De acordo com Naim e Towill (1994), na fase de verificação do modelo, antes de cada rodada de simulação, determina-se o comportamento esperado nas condições estabelecidas. Se o resultado for diferente, há erro na tradução computacional, ou mesmo nas premissas do próprio modelo. Dessa forma, a representação por meio do diagrama de estoque e fluxo exige precisão nas relações entre as variáveis dos sistemas, provocando uma evolução do entendimento do sistema e possíveis alterações no diagrama de causa e efeito.

Senge e Forrester (1980) apresentaram cinco testes para verificação estrutural de um modelo de simulação de DS: Adequação de limites, verificação de estrutura, consistência dimensional, verificação de parâmetros e condição extrema. Além desses, Sterman (2000) descreve outros dez testes: erro de integração, reprodução comportamental, anomalia de comportamento, membro da família, comportamento surpresa, análise de sensibilidade, melhoria do sistema.

Há diversas abordagens de modelagem e nem todos os testes propostos na literatura são aplicáveis. Dessa forma, Zagonel e Corbet (2006) revisaram a literatura relativa à base científica e prática de modelagem em DS e o resultado foi um reagrupamento dos testes em cinco categorias: mapeamento do sistema; modelagem quantitativa; teste de hipóteses; análise de incertezas; e previsão/otimização. Essa classificação, segundo os autores, tem o objetivo de

facilitar a identificação do subconjunto de testes mais apropriado para cada objetivo da modelagem.

O mapeamento do sistema relaciona-se com os diagramas de causa e efeito, estoque e fluxo ou qualquer forma de organização dos elementos que formam um sistema, com intuito de identificar as principais interações causais. Quando construído coletivamente, conjectura uma perspectiva compartilhada sobre o assunto em questão, fornece informações dinâmicas preliminares e facilita o aparecimento e esclarecimento de suposições, auxiliando na comunicação (ZAGONEL; CORBET, 2006).

A modelagem quantitativa refere-se a formulação e a simulação do modelo, em que a diferença dessa categoria para o teste de hipóteses é que a formulação ainda é analítica, semelhante à categoria de mapeamento do sistema. A modelagem quantitativa tem foco na compreensão das estruturas de estoque e fluxo e aplica-se na representação de sistemas quantificáveis (ZAGONEL; CORBET, 2006).

A modelagem de testes de hipóteses é focada no problema, em que a estrutura do sistema é agregada o máximo possível e a complexidade de detalhes é evitada (ZAGONEL E CORBET, 2006). O teste de hipóteses é um procedimento dedutivo, o qual verifica se uma estrutura específica de *feedback* é capaz de explicar ou produzir um comportamento particular (FORRESTER, 1961).

A análise de incerteza em dinâmica de sistemas por diversas vezes é chamada de análise de sensibilidade, em que a sensibilidade ao comportamento é assumida de forma frequente, mostrando que os comportamentos das variáveis de interesse não mudam significativamente se os parâmetros forem variados dentro de intervalos razoáveis, ou mesmo se mudanças justificáveis são realizadas dentro dos limites do modelo (ZAGONEL; CORBET, 2006).

Por último, a categoria “previsão e otimização” refere-se à previsão de padrões futuros de comportamento, mudanças nesses padrões e previsão de eventos, incluindo questões de pesquisa que visam encontrar soluções ótimas ou

robustas. Esse não é o foco principal em DS, tido como aprendizado, compreensão e explicação de comportamentos dos sistemas. A previsão é apenas uma extensão em que os parâmetros são alterados em intervalos razoáveis, para examinar os resultados possíveis de uma variável em um determinado momento, mas a previsão quantitativa raramente é um objetivo na prática de Dinâmica de Sistemas (ZAGONEL; CORBET, 2006).

Assim, para cada categoria de modelagem, existe um conjunto de testes mais apropriados a serem realizados para a confiabilidade do modelo. O Quadro 2 resume os 24 testes propostos por Forrester e Senge (1980) e Sterman (2000) agrupados nas 5 categorias sugeridas por Zagonel e Corbet (2006).

Quadro 2 - 24 testes agrupados em 5 categorias.

Mapeamento do Sistema	Modelagem Quantitativa	Teste de Hipóteses	Análise de Incertezas	Previsão e Otimização								
Validação visual	Conservação Física	Teste qualitativo de comportamento-problema	Análise de sensibilidade quantitativa	Correspondência de comportamento								
Validação das regras de decisão	Consistência dimensional	Adequação de limites (problema de endogeneidade)	Análise de sensibilidade política	Previsão de comportamento								
	Erro de Integração	Validade das regras de decisão (foco político)	Adequação de limites implicações políticas)	Previsão de comportamento alterado								
	Teste de condições extremas	Avaliação de comportamentos inesperados	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Categoria do Teste</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">Básico</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Intermediário</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Avançado</td> </tr> </tbody> </table>		Categoria do Teste		Básico		Intermediário		Avançado	
Categoria do Teste												
Básico												
Intermediário												
Avançado												
	Avaliação de parâmetros	Análise de sensibilidade do comportamento										
	Reprodução de comportamentos básicos	Teste de condições extremas (foco no comportamento do modelo)										
	Teste endógeno de reprodução de comportamentos	Testes de anomalia de comportamento (testes de suposições alteradas)										
	Teste de adequação de limites	Membro da família (generabilidade)										

Fonte: Adaptado de Zaganel e Cobert (2006).

6 PROCEDIMENTO DE PESQUISA

Este trabalho possui natureza aplicada e abordagem quantitativa. Pesquisas com natureza aplicada envolvem verdades e interesses locais, objetivando desenvolver conhecimentos voltados à aplicação prática e à solução de problemas específicos (SILVA; MENEZES, 2005). Estudos com abordagem quantitativa traduzem dados e informações em números, visando classificá-los e analisá-los metodicamente, necessitando do uso de recursos e de técnicas, principalmente, estatísticas (MORESI, 2003).

6.1 ETAPA 1: IDENTIFICAÇÃO NA LITERATURA DAS RELAÇÕES ENTRE AS VARIÁVEIS ESTUDADAS

O objetivo desta etapa foi realizar de uma revisão bibliográfica em conteúdos especializados voltados à identificação e contextualização do problema. Da mesma forma, pretendeu-se delimitar o foco do estudo e elencar os objetivos analíticos.

De modo não exaustivo, pôde-se constatar que as investigações acerca das relações existentes entre as variáveis estudadas nesse trabalho devem ser tratadas de maneira abrangente, pois o estudo é feito para todo o Brasil.

Após revisão de alguns trabalhos, constatou-se nenhuma aplicação da metodologia utilizada (dinâmica de sistemas) para solução do problema proposto. Tais aplicações serviram de base estrutural para este estudo.

Adicionalmente, a revisão bibliográfica permitiu verificar que não há trabalho aplicado para o caso do Brasil, o que tornou oportuno a realização do mesmo.

6.2 ETAPA 2: FORMULAÇÃO DO MODELO

O objetivo desta etapa foi identificar todas as variáveis e como elas se relacionam. Para isso, primeiramente realizou-se o levantamento dos fatores que influenciam o sistema, delimitado na etapa anterior, e de identificação da relação

de causa e efeito entre essas variáveis no decurso do tempo, inserida nas fronteiras do sistema.

A Etapa 1 permitiu verificar que o trabalho de Achour e Belloumi (2016) aborda as variáveis estudadas, porém utilizando método econométrico para avaliar as relações. Apesar de o foco ser diferente, este trabalho serviu de base para a reflexão e aplicação do caso brasileiro utilizando a dinâmica de sistemas.

A relação entre estes elementos serviu de base para a construção do diagrama de causa e efeito e seu consequente equacionamento. Tanto a construção do diagrama causal, como o equacionamento das variáveis identificadas, foram realizados após revisão bibliográfica nos Periódicos Capes, utilizando as palavras-chave emissão de CO₂, PIB, modo rodoviário, em português. As palavras-chaves utilizadas pela busca nos periódicos em inglês foram CO₂ *emission*, *GDP*, *transport sector*. Após essa busca, pode-se realizar a leitura e análise de diferentes artigos que serviram como base para explicar as relações apresentadas no modelo formulado apresentado no Capítulo 5 deste trabalho.

A partir do diagrama de causa e efeito foi realizado o equacionamento do modelo. Essa etapa consistiu na tradução das variáveis relacionadas pelo diagrama causal em variáveis que acumulem mudanças efetuadas no decurso temporal (estoques) e variáveis que influenciam essas mudanças (fluxos e variáveis auxiliares). Nessa etapa, por meio de revisão bibliográfica, foram definidas equações para relacionar as variáveis-chaves do trabalho.

6.3 ETAPA 3: OBTENÇÃO DE PARÂMETROS

Almejou-se, nesta etapa, obter os dados necessários para a simulação. Para isso, uma pesquisa documental foi realizada.

Os dados necessários ao cumprimento dessa etapa foram levantados a partir de publicações oficiais, tais como relatórios de órgãos componentes do setor de transporte brasileiro e artigos relacionados à investimento em infraestrutura no Brasil. As informações necessárias para o cumprimento dessa etapa bem como

os tratamentos realizados sobre os mesmos estão expostas no Capítulo 8 desta dissertação.

6.4 ETAPA 4: TESTES

O desafio dessa etapa foi o da obtenção de equações algébricas que emulem, o mais próximo possível da realidade, o comportamento das variáveis a cada passo de tempo (STERMAN, 2000). Entretanto, antes de partir para a simulação, deve-se garantir o teste do modelo, utilizando os testes descritos no subcapítulo anterior. O objetivo desses testes é o de garantir que os dados obtidos a partir da simulação computacional do modelo sejam válidos e próximos o suficiente da realidade.

A confecção do modelo, bem como os testes e a simulação, foram realizadas com o uso do *software* Vensim[®] PLE (*Personal Learning Edition*), uma versão gratuita da empresa Ventana Systems, destinado para uso pessoal e educacional. Esse *software* disponibiliza dois tipos de métodos para integração numérica: o de Euler e o de Runge-Kutta de quarta ordem (RK4). Existe um *trade-off* entre esses métodos: o primeiro se mostra mais simples e mais rápido, enquanto o segundo é mais preciso, exigindo um tempo computacional maior (STERMAN, 2000). Vale ressaltar que, como as equações contidas no modelo proposto (Capítulo 5) foram, em sua totalidade, de primeira ordem, optou-se pelo método de integração de Euler. Além disso, possíveis erros de precisão ocasionados por esse método de integração podem ser minimizados por meio de testes de erro de integração (STERMAN, 2000).

6.5 ETAPA 5: DEFINIÇÃO E ANÁLISE DE CENÁRIOS

Após a realização dos testes, foi possível obter um modelo confiável para a simulação dos cenários.

O levantamento dos dados históricos do crescimento do PIB, extensão de rodovias pavimentadas, emissão de CO₂ e consumo energético, bem como as projeções econômicas governamentais permitiram a simulação do modelo. A

partir desse levantamento foi possível estabelecer-se os cenários de simulação, descritos no Capítulo 10, cujos resultados são descritos e discutidos no Capítulo 11 deste trabalho.

7 FORMULAÇÃO DO MODELO

A formulação do modelo foi dividida em duas etapas: primeiramente, foi elaborado um diagrama de causa e efeito para relacionar todas as variáveis definidas no escopo do trabalho. Após essa etapa teórica, realizou-se o equacionamento do modelo por meio do diagrama de estoque e fluxo.

7.1 DIAGRAMA DE CAUSA E EFEITO

Para elaboração do diagrama de causa e efeito foram consideradas as relações causais empregadas nas atividades de transporte (modo rodoviário), investimento em infraestrutura (extensão de vias pavimentadas), emissão de CO₂, crescimento econômico, frota de veículos e valor adicionado pelo transporte.

Existe uma ligação clara entre crescimento econômico e transporte (ONG; MAHLIA; MASJUKI, 2012). Gwilliam (1998) explica que o processo de crescimento implica em uma crescente demanda de transporte para que seja possível acessar os diferentes mercados. Dessa forma, a debilidade do setor de transporte limita o desenvolvimento. Não somente porque as condições ruins de transporte mitigam as alternativas de ganhos através do comércio, mas também porque uma infraestrutura ruim afeta negativamente a produtividade de outros setores.

Nesse cenário, o desenvolvimento da infraestrutura afeta o crescimento econômico de diversas maneiras. O aumento nos investimentos em infraestrutura de transporte em uma região provoca uma redução nos custos dos insumos industriais no processo de produção. Esta redução deve-se as melhorias no fluxo de transporte que, conseqüentemente, promove maior circulação de capital na região, inferindo em crescimento da economia local. Somado a isso, o investimento em infraestrutura apresenta impacto positivo na educação e na saúde da sociedade, o que em longo prazo acarreta em mão-de-obra mais qualificada e mais eficiente (SNIESKA; SIMKUNAITE, 2009).

Desta forma, os investimentos em infraestrutura de transporte é um fator chave para o crescimento econômico. O nível de investimento em infraestrutura de transporte em uma região ou país está ligado diretamente a atratividade industrial, já que o custo de transporte é um fator determinante para a escolha da localização organizacional (DORANTES; PAEZ; VASSALLO, 2012).

Outro fator que está ligado diretamente com o aumento dos níveis de investimentos em infraestrutura de transporte é o nível de atratividade da região. Isso significa que quanto maior for o investimento, maior será a atratividade local para a instalação de novas empresas (BANISTER; BERECHMAN, 2001). Segundo Diaz, Behr e Ng (2016), o investimento em infraestrutura de transporte em uma região promove um aumento na responsividade e flexibilidade na entrega de bens e serviços, o que potencialmente aumenta a atratividade local. Conseqüentemente, mais empresas são instaladas na região o que gera novos empregos para a cidade e municípios próximos, elevando assim a economia da região. O aumento do investimento em infraestrutura, também promove um maior fluxo de veículos na região, o que promove maior emissão de CO₂, por consequência (CHANDRAN; TANG, 2013).

A emissão de CO₂ apresenta uma relação inversamente proporcional ao crescimento econômico, ou seja, quanto maior a emissão de CO₂, menor será o crescimento econômico a longo prazo, devido ao aumento da poluição e emissão de gases causadores do efeito estufa, tornando o local menos atrativo para receber investimentos (CHANDRAN; TANG, 2013). Vershinina et al (2015) explicam que os indicadores ambientais são muito importantes do ponto de vista de um investidor estrangeiro que pretende investir diretamente na economia de uma região, porque nos países desenvolvidos a legislação ambiental é bastante rígida e sua não conformidade implica em sanções financeiras e administrativas significativas. Portanto, a avaliação global das despesas de manutenção do ambiente natural é uma medida importante no quadro geral de indicadores de atratividade do investimento da economia de certo local. Sari e Soytaş (2009) reforçam a ideia, explicando que o aumento nos níveis de emissões contribui com os danos decorrentes do efeito estufa e podem provocar escassez de água

e processo de desertificação em algumas nações, o que impactaria negativamente no desempenho econômico de uma nação. Assim, Coondoo e Dinda (2002) em seu trabalho, sugerem que os países desenvolvidos e em desenvolvimento devem sacrificar o crescimento econômico para reduzir os níveis de emissão.

O crescimento econômico, também possui relação direta com o consumo energético. Vários estudos, dedicam-se na compreensão dessa relação. Stern (1993), analisou os efeitos do uso de energia sobre o crescimento econômico e concluiu que o uso da energia pode ser limitador para o crescimento do produto interno de um país. Chontanawat, Hunt e Pierse (2008), também concluíram que existe a relação proporcional entre esses dois fatores, tanto do consumo de energia para o crescimento do produto, quanto o efeito que políticas restritivas para utilização energética, com o objetivo de conter a emissão de gases do efeito estufa, teriam um efeito redutor sobre o crescimento da economia. Ghali e El-Sakka (2004) também corroboraram com essa relação, demonstrando em seu estudo que existe um fluxo bidirecional entre o PIB e o consumo de energia, concluído também que a energia pode ser um a fator limitante para incremento do produto. Narayan e Smith (2008) chegaram à conclusão que a redução do consumo energético teria efeito negativo sobre a atividade produtiva dos países pertencentes ao G7 e a implantação de medidas que focassem em prevenção ambiental deveriam considerar alternativas para minimizar os seus efeitos sobre o crescimento econômico.

A relação bidirecional entre crescimento econômico e investimento em infraestrutura de transporte (Figura 5) é determinante para o modelo, pois é a única relação que apresenta um comportamento de crescimento exponencial (ciclo positivo) ao sistema. Os demais *feedbacks* do modelo são de caráter negativo, cujo objetivo é de balancear o sistema. Para melhor entendimento, a leitura da Figura 5 deve ser feita por pares da seguinte forma: o crescimento econômico é diretamente proporcional ao investimento em infraestrutura de transporte, que por sua vez é diretamente proporcional ao crescimento econômico.

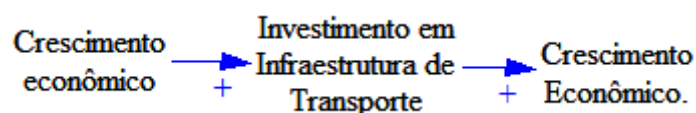


Figura 5 – Relação entre crescimento econômico e investimentos em infraestrutura de transporte.
 Fonte: Elaborado pela autora.

O crescimento econômico apresenta uma relação diretamente proporcional com a frota de veículos, que também apresenta relação diretamente proporcional com a emissão de CO₂. Ao aumentar o crescimento econômico, há um aumento nas vendas de veículos, o que ocasiona uma maior emissão de CO₂, devido ao aumento de atividades de transporte (ONG; MAHLIA; MASJUKI, 2012). Contudo, a emissão de CO₂ apresenta uma relação inversamente proporcional ao crescimento econômico, ou seja, ao aumentar a poluição local, a região se torna menos atrativa, diminuindo assim o crescimento econômico (Figura 6) (CHANDRAN; TANG, 2013).



Figura 6 – Relações entre crescimento econômico, frota de veículos e emissão de CO₂.
 Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme explicado anteriormente, o crescimento econômico apresenta uma relação proporcional com a frota de veículos que, por sua vez, também apresenta relação diretamente proporcional com o consumo de energia. Ao aumentar o crescimento econômico, aumenta-se a frota circulante, e, conseqüentemente, o consumo de energia (combustível) também é elevado. O consumo de energia é diretamente proporcional à emissão de CO₂. Niu et al (2011) concluíram que a principal causa das emissões de CO₂ é o consumo de energia, especialmente nos países em desenvolvimento. Ang (2008) também afirmou que a emissão de CO₂ apresenta uma relação negativa com o crescimento econômico, concluindo assim um *feedback* negativo do sistema (Figura 7).

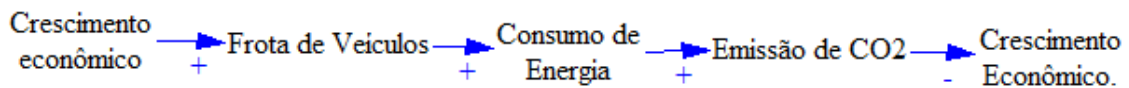


Figura 7 – Relações entre crescimento econômico, frota de veículos, consumo de energia e emissão de CO₂.

Fonte: Elaborado pela autora.

A relação entre o investimento em infraestrutura e o consumo de energia é de caráter direto e proporcional, ou seja, ao aumentar os níveis de investimento em infraestrutura de transporte, o consumo energético também é elevado, pois, ocorrerá um aumento nas atividades de transporte da região. O consumo de energia apresenta uma relação positiva com a emissão de CO₂, a emissão de CO₂ possui uma relação negativa com o crescimento econômico e o crescimento econômico apresenta uma relação proporcional com o investimento em infraestrutura, concluindo assim outro *feedback* negativo do sistema (Figura 8) (ANCHOUR; BELLOUMII, 2016).

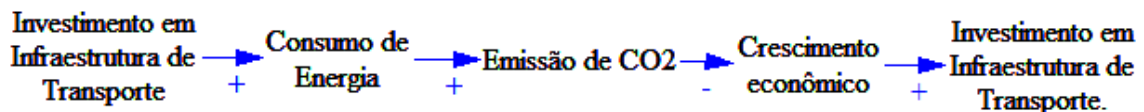


Figura 8 – Relações entre investimento em infraestrutura de transporte, consumo de energia, emissão de CO₂ e crescimento econômico.

Fonte: Elaborado pela autora.

Por fim, o último *feedback* é composto pela relação direta e proporcional entre o crescimento econômico, investimento em infraestrutura de transporte, valor adicionado ao transporte, consumo de energia, emissão de CO₂, e a relação negativa entre emissão de CO₂ com o crescimento econômico (Figura 9). O valor adicionado ao transporte é um dado estatístico que representa o quanto o setor de transporte gerou de riqueza para o país. Vale destacar, que um maior investimento em infraestrutura de transporte contribui com o aumento das atividades inerentes ao setor, o que coopera positivamente com o valor agregado do setor de transporte, que, conseqüentemente, demandará uma maior utilização energética (FRISCHTAK; MOURÃO, 2017).

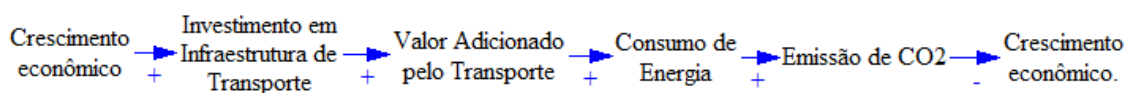


Figura 9 - Relações entre investimento em infraestrutura de transporte, consumo de energia, emissão de CO₂, valor adicionado pelo transporte e crescimento econômico.

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 10 descreve o comportamento entre as variáveis utilizadas para desenvolver o modelo proposto e o Quadro 3 descreve os *feedbacks* do diagrama de causa e efeito separadamente para melhor entendimento.

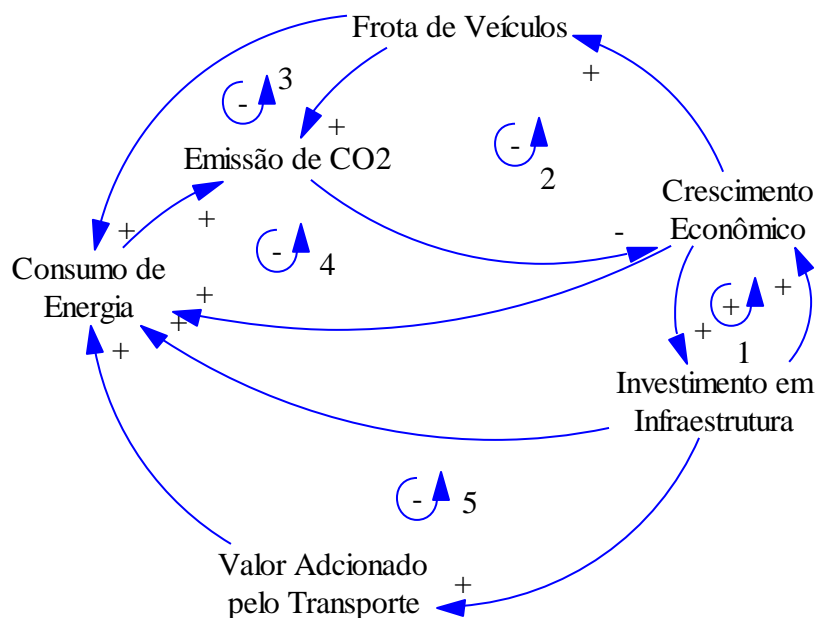


Figura 10: Diagrama de causa e efeito.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Quadro 3 – Descrição dos feedbacks do diagrama de causa e efeito

Identificação <i>Feedback</i>	Descrição do <i>feedback</i>
1	<p>Diagrama de feedback 1: Um ciclo de reforço (+) entre Crescimento Econômico e Investimento em Infraestrutura. O crescimento econômico leva a mais investimento em infraestrutura, o que por sua vez estimula o crescimento econômico.</p>
2	<p>Diagrama de feedback 2: Um ciclo de amortecimento (-) envolvendo Frota de Veículos, Crescimento Econômico e Emissão de CO2. O crescimento econômico aumenta a frota de veículos, o que aumenta as emissões de CO2, o que por sua vez reduz o crescimento econômico.</p>
3	<p>Diagrama de feedback 3: Um ciclo de amortecimento (-) envolvendo Frota de Veículos, Crescimento Econômico, Emissão de CO2 e Consumo de Energia. O crescimento econômico aumenta o consumo de energia e a frota de veículos, o que aumenta as emissões de CO2, o que por sua vez reduz o crescimento econômico.</p>
4	<p>Diagrama de feedback 4: Um ciclo de reforço (+) envolvendo Emissão de CO2, Crescimento Econômico, Investimento em Infraestrutura e Consumo de Energia. O crescimento econômico aumenta o consumo de energia e as emissões de CO2, o que estimula o investimento em infraestrutura, o que por sua vez estimula o crescimento econômico.</p>
5	<p>Diagrama de feedback 5: Um ciclo de reforço (+) envolvendo Emissão de CO2, Crescimento Econômico, Investimento em Infraestrutura, Valor Adicionado pelo Transporte e Consumo de Energia. O crescimento econômico aumenta o consumo de energia e as emissões de CO2, o que estimula o investimento em infraestrutura, o que aumenta o valor adicionado pelo transporte, o que por sua vez estimula o crescimento econômico.</p>

Fonte: Elaborado pela autora.

Com base nos conceitos explanados e para a simulação ser realizada, torna-se necessário estruturar o modelo em diagramas de estoque e fluxo e equacionar as variáveis inter-relacionadas. A seguir, são apresentados os diagramas de estoque e fluxo, bem como as equações que compõem a estrutura matemática do modelo proposto.

7.2 DIAGRAMA DE ESTOQUE E FLUXO

Para a melhor compreensão do modelo o diagrama de estoque e fluxo será apresentado em cinco quatro submodelos A, B, C e D. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** demonstra quais são as variáveis de entrada, ou seja, as que foram inseridas para o período simulado, e as variáveis de saída, as quais fornecem as informações para análise do modelo proposto. O submodelo D não está representado na Figura 11, pois não possui nenhuma variável de entrada. Suas entradas são dados provenientes do submodelo C.

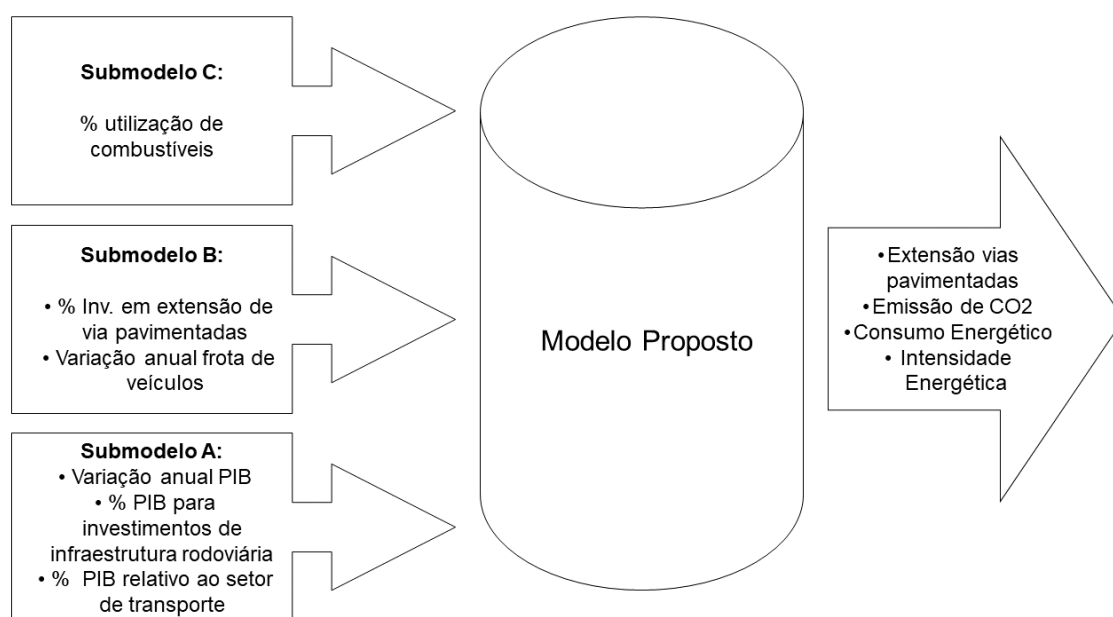


Figura 11 – Variáveis de entrada e saída do modelo.
Fonte: Elaborado pela autora.

Vale destacar que algumas relações apresentadas no diagrama de causa e efeito não foram estruturadas no diagrama de estoque fluxo. Isso ocorreu devido a complexidade em modelar matematicamente essas relações, visto que para quantificar essas relações, questões econômicas complexas devem ser consideradas, o que foge do escopo definido no presente estudo. No Capítulo 9 (testes) a ausência dessas relações serão melhores discutidas. A Figura 12 destaca essas relações que não foram consideradas no diagrama de estoque e fluxo.

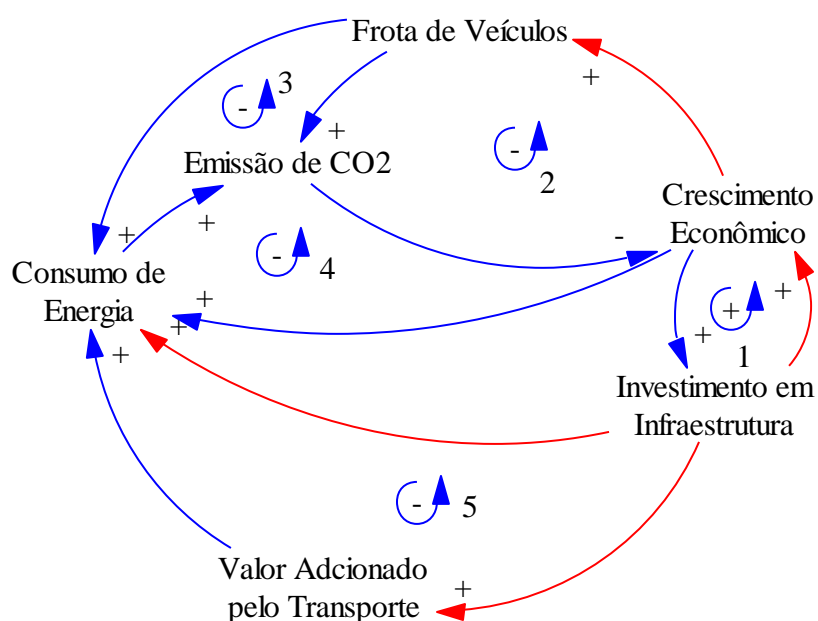


Figura 12 – Relações não consideradas no diagrama de estoque e fluxo (em vermelho)
 Fonte: Elaborado pela autora.

7.2.1 Submodelo A: Variáveis de Cunho Econômico

Nesse submodelo são calculados os seguintes estoques: PIB, a contribuição do setor de transporte ao PIB (valor adicionado pelo transporte) e os investimentos destinados à infraestrutura do setor de transporte no Brasil (investimento em infraestrutura). Os estoques Investimentos em Infraestrutura e Valor adicionado

pelo Transporte, dependem do PIB para serem calculados, as demais variáveis podem ser visualizadas na Figura 13.

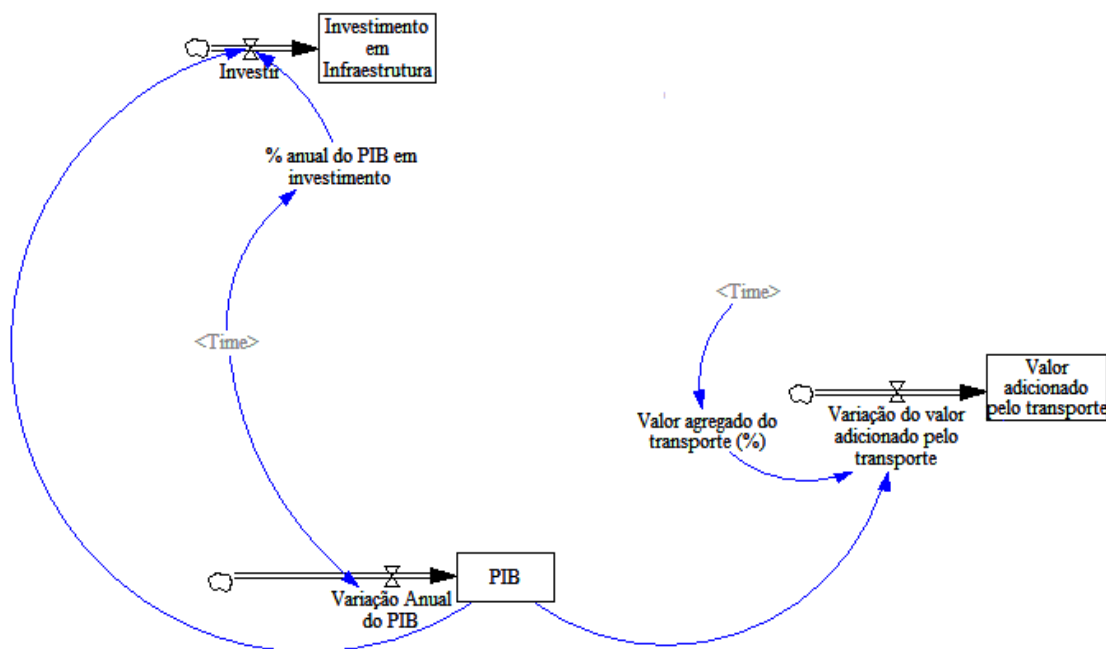


Figura 13 - Diagrama de causa e efeito submodelo A
Fonte: Elaborado pela autora.

No modelo desenvolvido, o PIB é representado como um estoque que acumula ao longo do período estudado sua variação monetária, somado o valor inicial do estoque no período (PIB_0), conforme demonstrado na Equação 1.

$$\int_{t_0}^t (PIB + \text{variação anual do PIB})dt + PIB_0 \quad (1)$$

O estoque valor adicionado pelo transporte (vat) refere-se à contribuição do setor de transporte ao PIB brasileiro. De acordo com Achour e Belloumi (2016) o valor adicionado ao transporte representa o quanto de valor o setor de transporte gera para o país. Ele acumula a variação do valor adicionado ao transporte ao longo do tempo por meio do fluxo de variação do valor adicionado pelo transporte ($vvat$) a partir do PIB de transporte atual (vat_0) (Equação 2).

$$vat = \int_{t_0}^t (vvat)dt + vat_0 \quad (2)$$

O fluxo variação do valor adicionado ao transporte é obtido pela multiplicação do PIB pela porcentagem anual de contribuição do setor de transporte, sendo o último uma variável auxiliar, ou seja, inserido como dado de entrada no modelo (Equação 3).

$$vvat = PIB * VAT\% \quad (3)$$

Os investimentos em infraestrutura no Brasil são definidos como porcentagem do PIB. No modelo, o estoque Investimento em Infraestrutura (INVINF) representa os investimentos federais destinados ao setor de transportes no Brasil. Nele estão inclusos os modais rodoviário, aquaviário, aéreo e ferroviário. O estoque é acumulado por meio do fluxo de investimentos anual (*investir*) a partir do montante de investimento inicial (*invinf₀*) (Equação 4).

$$INVINF = \int_{t_0}^t (investir)dt + invinf_0 \quad (4)$$

O fluxo *investir* é o produto entre a porcentagem do PIB (*%PIBINV*) destinada a investimentos para o modo rodoviário, o qual é inserido como dado de entrada no modelo proposto e o PIB (*PIB*) (Equação 5).

$$investir = \%PIBINV * PIB \quad (5)$$

Os investimentos empregados na infraestrutura servirão de base para o cálculo da infraestrutura rodoviária proposta pelo modelo, o qual será detalhado no submodelo B.

7.2.2 Submodelo B: Infraestrutura Rodoviária

Nesse módulo, é proposta uma relação entre os investimentos no setor de transporte no Brasil e sua conversão em extensão de vias, mais precisamente em rodovias pavimentadas. Para isso, utilizou-se o estoque Investimento em Infraestrutura para determinar a quantidade de rodovias pavimentadas anualmente.

Essas rodovias sofrem desgastes ao longo do tempo, o que impacta na extensão de quilômetros pavimentados total. Para simular um desgaste das rodovias

federais brasileiras, utilizou-se a frota de veículos circulante no Brasil. A partir dela foi estimado um fluxo médio anual usado para calcular o desgaste. Vale ressaltar, que existem outros fatores que implicam em desgaste da rodovia, como o excesso de carga transportada, intemperismos e qualidade do pavimento (GHISOLFI, 2018). Porém, por se tratar de um modelo genérico e pela dificuldade de simular os outros fatores em âmbito nacional, optou-se por estimar o desgaste apenas na circulação da frota brasileira. A adequação desta estimativa foi realizada com base nos dados passados, comparado com o teste de reprodução comportamental que será apresentado no Capítulo 9. A relação apresentada na Figura 14 já inclui os ajustes realizados na etapa de testes.

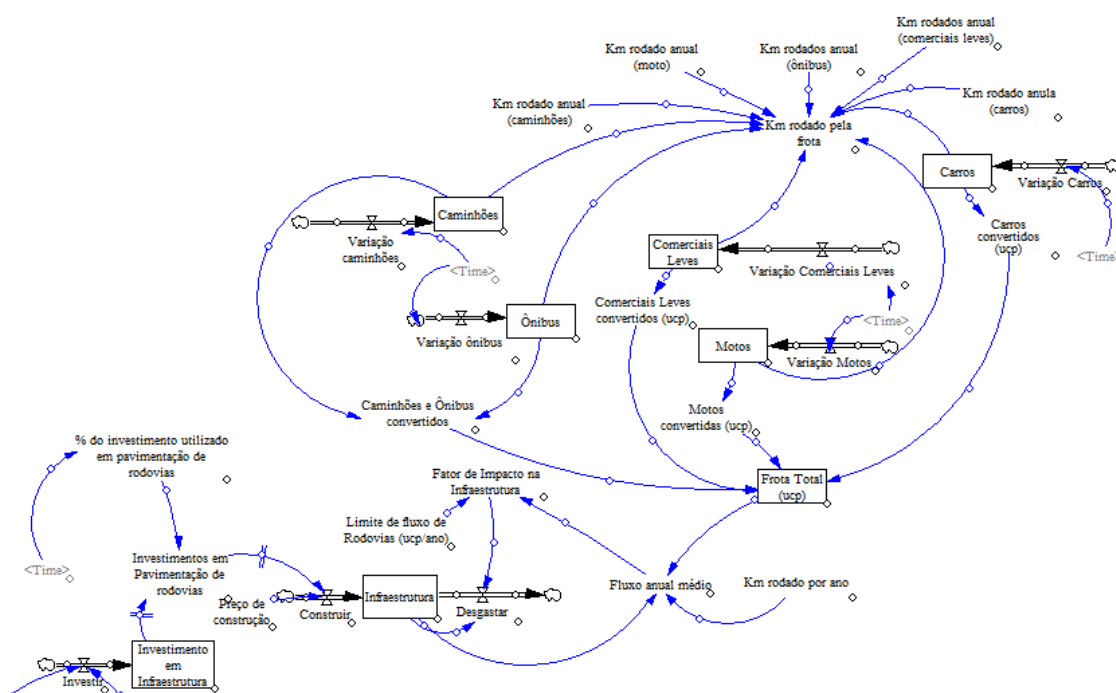


Figura 14 - Diagrama de estoque e fluxo submodelo B
Fonte: Elaborado pela autora.

O estoque *infraestrutura* (*inf*) é dado em quilômetros e é calculado por meio da integração da diferença entre as taxas *construir* (*const*) e *desgastar* (*desg*) para um dado período, a partir da infraestrutura atual (*inf*₀) conforme Equação 6.

$$Inf = \int_{t_0}^t (const - desg) dt + inf_0 \quad (6)$$

Os estoques Caminhões, Ônibus, Motos, Carros e Comerciais leves representam a frota brasileira de veículos que utilizam combustíveis fósseis, etanol e biodiesel. Essa classificação da frota está em acordo com a utilizada nos estudos realizados pela Confederação Nacional de Transporte - CNT. Vale ressaltar que na categoria caminhões há diversas classificações, e conseqüentemente, diferentes níveis de consumo energético e emissão de CO₂. Porém, com o intuito de simplificar o modelo e por não ter dados disponíveis de das diferentes categorias, utilizou-se um consumo médio para estimar o a quilometragem rodada anual de acordo com 1º Inventário de Emissões de Atmosféricas de Veículos Automotores Rodoviários (BRASIL, 2011)

Esses estoques somente acumulam ao longo do tempo, uma vez que para calculá-los foram utilizadas as variações de cada tipo de veículo somadas a frota inicial. A Equação 7 representa de forma genérica como esses estoques foram obtidos para cada tipo de veículo.

$$\text{Tipo de veículo} = \int (\text{variação tipo de veículo}) dt + \text{quantidade inicial}_0 \quad (7)$$

Para o cálculo do estoque frota total, é necessário transformar todos os tipos de veículos em uma unidade padrão, definida como unidade de carros de passeio (ucp). Essa conversão faz-se necessária, uma vez que para calcular o desgaste da rodovia é necessário haver um fluxo de veículos, em unidade dimensional compatível, para que seja possível comparar com o limite de fluxo suportado pelos pavimentos das rodovias nacionais. Desta forma, todos os tipos de veículos foram convertidos em carros de passeio, obtidos pelo produto entre a quantidade e o fator de conversão para cada tipo de veículo especificado.

Após essa conversão é possível obter a frota total em ucp de acordo com a integração da soma de todos os veículos somado a quantidade inicial (FT₀), conforme mostrado na Equação 8.

$$\int_{t_0}^t (\text{Caminhões conv} + \text{Motos conv} + \text{Carros} + \text{Com Leves conv} + \text{Ônibus conv}) dt + FT_0 \quad (8)$$

O desgaste $desg$ depende diretamente do *fluxo anual médio* ($flxmed$) nas rodovias e do limite de fluxo suportado pelas rodovias ($LFROD$), o qual possui valor constante. O $flxmed$ é calculado conforme Equação 9.

$$flxmed = \left(\frac{kmrod * FT}{inf} \right) \quad (9)$$

A variável auxiliar quilômetro rodado pela frota ($kmrod$) foi definida com base na quantidade de quilômetros em média que um carro trafega em um ano no Brasil. Para determinação desse parâmetro, utilizou-se a idade média de automóveis no Brasil. De acordo com o 1º Inventário de Emissões de Atmosféricas de Veículos Automotores Rodoviários realizado pelo Ministério de Meio Ambiente em 2013 (BRASIL, 2011). Com $flxmed$ e $LFROD$ conhecidos, pode-se obter o fator de impacto na infraestrutura ($FIINF$), conforme Equação 10.

$$FIINF = \frac{flxmedio}{LFROD} \quad (10)$$

O fluxo *desgastar* foi obtido por meio de uma condicionante modelada com o auxílio da função *if then else*. A fim de conseguir um comportamento mais próximo do real, estabeleceu-se que só ocorreria desgaste na rodovia, a partir do momento que o $flxmed$ fosse maior que o $LFROD$, ou seja, quando o valor de $FIINF$ fosse maior que 1. Nesses casos, definiu-se um coeficiente constante para o desgaste equivalente a 0,5% da infraestrutura existente. A definição deste valor foi obtida na etapa de teste de comportamental e, por isso, será apresentada no Capítulo 8. A Equação 11 ilustra o cálculo do fluxo.

$$desg = \text{if then else } (FIINF > 1, 0.0019 * infraestrutura, 0) \quad (11)$$

Para cálculo do fluxo construir ($const$), utilizou-se o estoque Investimento em Infraestrutura para calcular o percentual desse investimento que é destinado para pavimentação de rodovias. Esse percentual foi inserido como parâmetro no modelo, uma vez que ele varia no decorrer do período. Além desses parâmetros, foi necessário o parâmetro “preço de construção”, o qual faz referência ao custo para se pavimentar um quilômetro de rodovia no Brasil. Dessa forma, pode-se calcular o fluxo “construir”, de acordo com a Equação 12.

$$const = INVINF/PC \quad (12)$$

Ainda no presente submodelo é calculada a variável auxiliar quilômetro rodado pela frota (*kmrodfrota*), a qual servirá de parâmetro para o submodelo C, que refere-se às emissões de CO₂ decorrente da utilização da frota brasileira. Para cada tipo de veículo que compõe a frota, a fim de simplificação, utilizou-se uma idade média correspondente para que pudesse definir a quantidade de quilômetros rodados para cada categoria da frota. Essa quantidade de quilômetros corresponde as constantes da Equação 13.

$$\begin{aligned} \text{Kmrodfrota} = & \text{Caminhões} * \text{"Km rodado anual (caminhões)"} + \\ & \text{Carros} * \text{"Km rodado anual (carros)"} + \\ & \text{"Km rodados anual (comerciais leves)} * \text{Comerciais Leves} + \\ & \text{Motos} * \text{"Km rodado anual (moto)"} + \text{Ônibus} * \text{"Km rodados anual (ônibus)"} \quad (13) \end{aligned}$$

7.2.3 Submodelo C: Emissões de Dióxido de Carbono pelo Modo Rodoviário

O submodelo C compreende as variáveis e equações que determinam o valor total das emissões de CO₂ decorrentes das atividades do modo rodoviário no Brasil, conforme ilustrado da Figura 15.

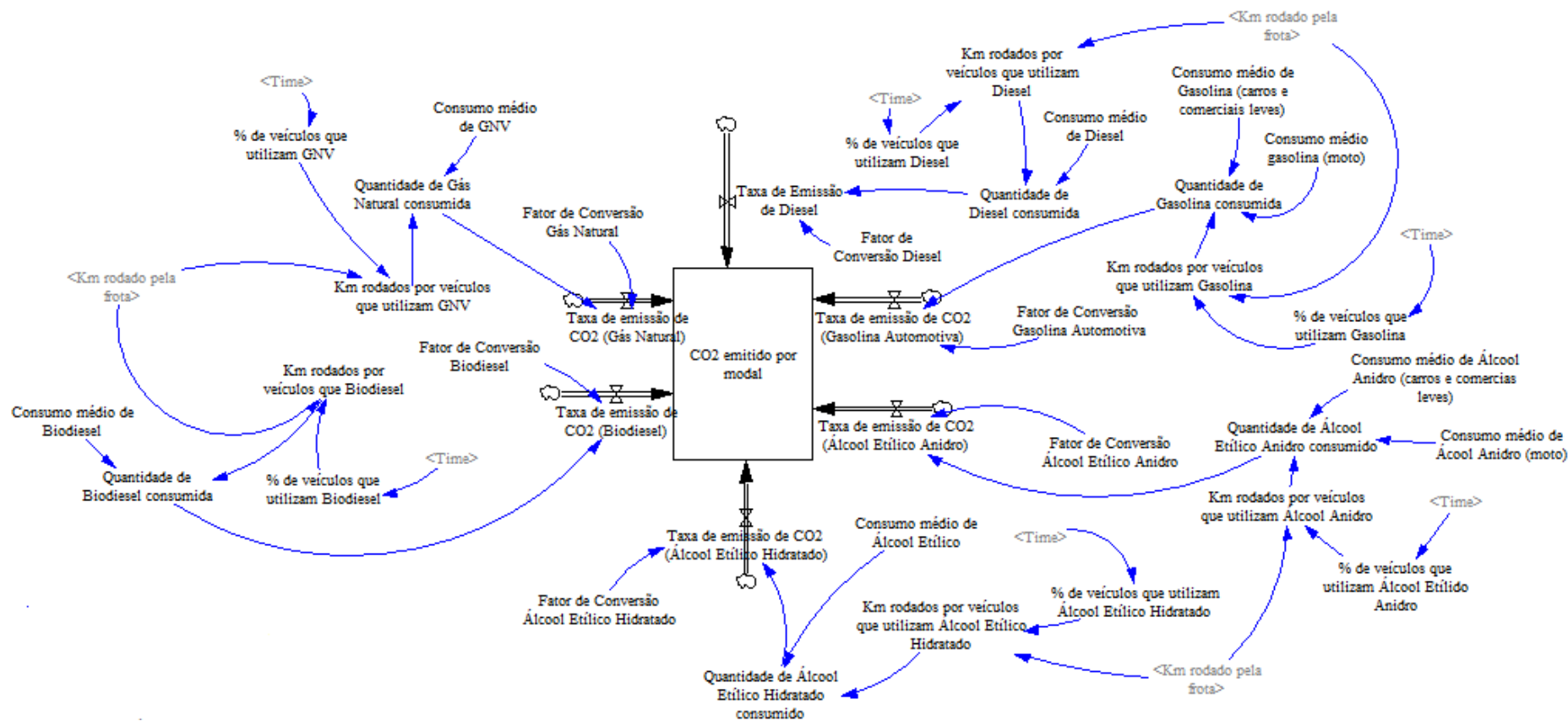


Figura 15 – Diagrama estoque e fluxo submodelo C.
 Fonte: Elaborado pela autora.

O estoque CO_2 emitido pelo modo ($co2emitmod$) acumula as emissões oriundas da queima dos combustíveis dos veículos. É dado pela integração da soma das taxas de emissão de CO_2 dos combustíveis utilizados no modo rodoviário: taxa de emissão de CO_2 do álcool etílico anidro, taxa de emissão de CO_2 do álcool etílico hidratado, taxa de emissão de CO_2 do biodiesel, taxa de emissão de CO_2 da gasolina, taxa de emissão de CO_2 do gás natural e taxa de emissão de CO_2 do diesel; a partir da quantidade de CO_2 emitida inicial ($co2emitmod_0$) (Equação 14).

$$CO_2 \text{ emitido} = \int_{t_0}^t (Taxa \text{ de emissão de } CO_2 \text{ (Álcool Etílico Anidro)} + Taxa \text{ de emissão de } CO_2 \text{ (Álcool Etílico Hidratado)} + Taxa \text{ de emissão de } CO_2 \text{ (Biodiesel)} + Taxa \text{ de emissão de } CO_2 \text{ (Gasolina Automotiva)} + Taxa \text{ de emissão de } CO_2 \text{ (Gás Natural)} + Taxa \text{ de Emissão de } CO_2 \text{ (Diesel)}) dt + co2emitmod_0 \quad (14)$$

As taxas de emissão de CO_2 dos diferentes combustíveis, consistem no produto do fator de conversão do combustível ($FC_{combustíveln}$) pela quantidade de combustível consumida pelos veículos ($QNT_{combustíveln}$), conforme Equação 15. O fator de conversão do combustível relaciona a quantidade de combustível consumida (L) em emissão de CO_2 ($kgCO_2$) e tem valor constante para cada tipo de combustível.

$$Taxa \text{ de emissão do combustível } n = FC_{combustíveln} * QNT_{combustíveln} \quad (15)$$

Para calcular a quantidade de combustível consumida, são necessários dois parâmetros: a quantidade de quilômetros percorrida por veículos que utilizam o combustível n ($KmRod_{combustíveln}$) e o consumo médio por veículo do combustível n ($Consc_{combustíveln}$). Este parâmetro é constante para cada tipo de combustível. O $KmRod_{combustíveln}$ é obtido por meio do produto entre o $kmrod$ e a porcentagem dos veículos que utilizam o combustível n ($\%_{combustíveln}$). Esse percentual é inserido no modelo como variável de entrada, uma vez que variam anualmente. Eles foram obtidos por meio da proporção de uso de

combustíveis pelo modo rodoviário. Dessa forma, pode-se calcular a quilometragem percorrida pelos veículos e posteriormente a quantidade de combustível n utilizada, conforme Equações 16 e 17.

$$QNT_{combustíveln} = KmRod_{combustíveln} * \quad (16)$$

$$Cons_{combustíveln} KmRod_{combustíveln} = \%_{combustíveln} * kmrod \quad (17)$$

A quantidade de combustível servirá também de parâmetro no Submodelo D, por meio dessa variável que será calculado o estoque de Energia Consumida pelo modo rodoviário.

7.2.4 Submodelo D: Consumo Energético do Modo Rodoviário

O Submodelo D calcula o consumo energético do modo rodoviário com base nos parâmetros determinado pelo Submodelo C. A Figura 16 apresenta as relações existentes nesse submodelo de forma detalhada

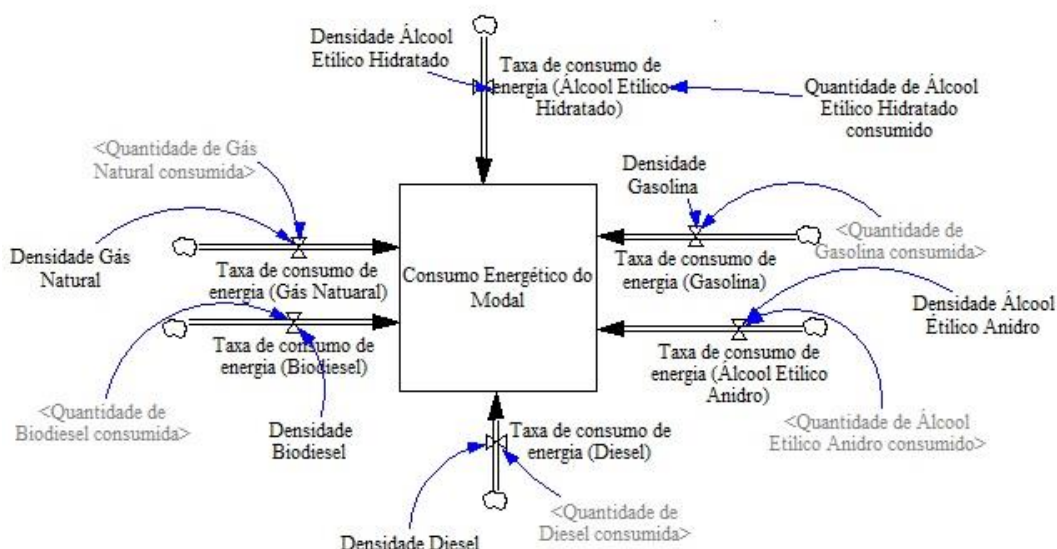


Figura 16 - Diagrama de Estoque e Fluxo submodelo D

Fonte: Elaborado pela autora

O estoque Consumo Energético do Modo acumula toda energia produzida anualmente pelo modo rodoviário e é determinado pela integração das taxas de

consumo de energia dos diferentes tipos de combustível a partir do consumo energético inicial ($consenerg_0$) conforme Equação 18.

$$\begin{aligned}
 consenerg = \int_{t_0}^t & (Taxa\ de\ consumo\ de\ energia\ (\acute{A}lcool\ Etílico\ Anidro) + \\
 & Taxa\ de\ consumo\ de\ energia\ (\acute{A}lcool\ Etílico\ Hidratado) + \\
 & Taxa\ de\ consumo\ de\ energia\ (Biodiesel) + \\
 & Taxa\ de\ consumo\ de\ energia\ (Gasolina) + \\
 & Taxa\ de\ consumo\ de\ energia\ (Gás\ Natuaral) + \\
 & Taxa\ de\ consumo\ de\ energia\ (Diesel))dt + consenerg_0(18)
 \end{aligned}$$

As taxas de consumo de energia pelos diferentes combustíveis, são obtidas por meio da multiplicação da $QNTcombustíveln$ (variável relativa à quantidade consumida do combustível n), da densidade de cada combustível ($Densidadecombustíveln$), o qual possui valor constante para cada tipo de combustível, e do valor constante 10^{-3} , que é fator de conversão de litros para metros cúbicos (Equação 19).

$$\begin{aligned}
 Taxa\ de\ consumo\ de\ energia\ combustíveln = QNTcombustíveln * (10^{-3}) * \\
 Densidadecombustíveln(19)
 \end{aligned}$$

A variável Intensidade Energética do setor de transporte relaciona os submodelos A, C e D e indiretamente o submodelo B, uma vez que ela deriva das equações do Submodelo A .

O índice de intensidade energética (IIE) é representado pela razão entre o consumo total de energia do setor de transporte, em unidade de energia, e o PIB do setor, expresso em unidades monetárias. O IIE evidencia o grau de eficiência da utilização energética em relação à riqueza do país, desta forma quanto menor o uso de energia por unidades monetárias, maior a eficiência da economia (ANP, 2001).

As relações existentes entre os submodelos citados podem ser constatadas na Figura 17.

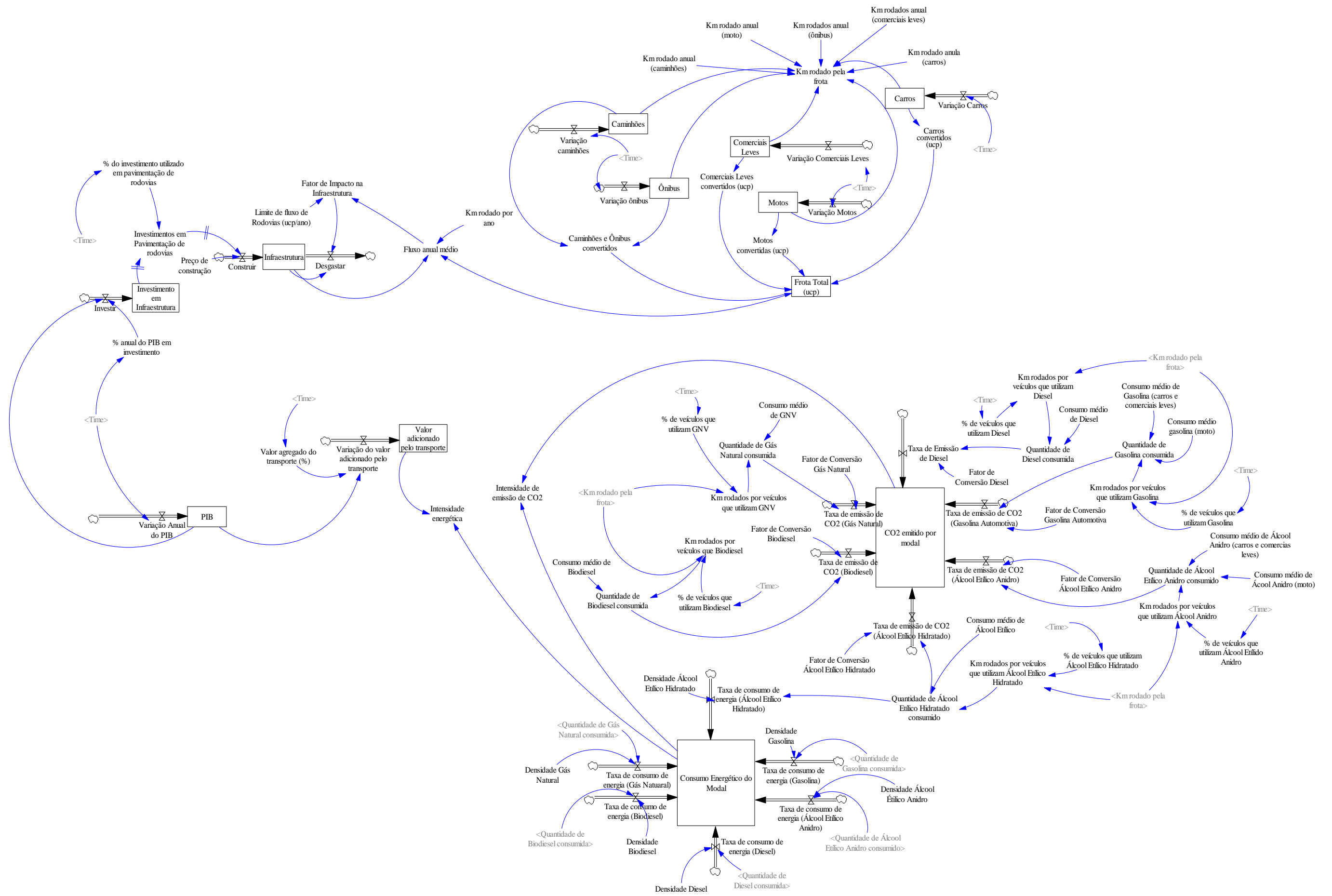


Figura 17 – Modelo proposto.
Fonte: Elaborado pela autora.

8 OBTENÇÃO DE PARÂMETROS

Neste capítulo será apresentado a forma de obtenção dos dados utilizados nas variáveis auxiliares ou os valores dos estoques iniciais do modelo para os testes do modelo e simulação dos cenários. O Apêndice B traz todos os parâmetros utilizados e não descritos nesse capítulo.

8.1 SUBMODELO A

Anualmente o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística divulga os dados relativos ao PIB do Brasil. A partir dessa base de dados, foi possível obter as variações do PIB entre os anos 2000 e 2016 para realização dos testes do modelo (IBGE, 2000 a 2016).

Para as projeções relativas ao PIB na simulação dos cenários, utilizou-se o relatório elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) de Caracterização do Cenário Macroeconômico para os próximos 10 anos, o qual projeta o PIB para os próximos 10 anos considerando diferentes cenários da economia brasileira (EPE, 2017).

Os percentuais relativos aos investimentos em infraestrutura do modo rodoviário relativos aos anos 2000 a 2016 foram obtidos em duas bases de dados: no estudo realizado por Frischtak (2009), o qual utilizou dados do Plano CNT de Transporte e Logística para os anos de 2000 a 2007 e os demais dados relativos aos anos de 2008 a 2016, do Estudo do Transporte Rodoviário realizado pela Confederação Nacional de Transporte (CNT), o qual desenvolveu um estudo sobre o modo com base nas séries históricas das pesquisas CNT de rodovias (CNT, 2017).

No que tange o valor adicionado ao transporte, a série histórica foi obtida pela base de dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2000 a 2016). Dessa forma, foi possível calcular os percentuais de participação do setor de transporte no PIB brasileiro para os anos de 2000 a 2016 para realização dos testes do modelo.

8.2 SUBMODELO B

Os investimentos em infraestrutura rodoviária são destinados para construção de rodovias, adequação de rodovias, recuperação e manutenção de rodovias. Estudos e projetos, fiscalização de rodovias, pagamentos de débitos, entre outros. Para simplificação do modelo, considerou-se apenas o que diz respeito a pavimentação de rodovias. Assim, por meio do Estudo do Transporte Rodoviário realizado pelo CNT, obteve-se os percentuais dos investimentos totais em infraestrutura que são empregados para esse fim (CNT, 2017).

O custo para pavimentação de rodovias foi obtido no Relatório de Pesquisa de Logística e Transportes no Brasil, o qual para cada quilômetro construído, dispense-se R\$ 1.500.000,00 (IPEA, 2016).

Os parâmetros de conversão dos veículos para ucp, de forma que possibilitasse a composição de tráfego em uma unidade padrão, foi realizada de acordo com os valores constantes no Quadro 4.

Quadro 4 - Fatores de equivalência de veículos

Veículos	Caminhões e Ônibus	Veículos Articulados	Motos
Fatores de Equivalência	2	3	0.5

Fonte: Akishino, 2010, p.190.

O parâmetro limite de fluxo de rodovias foi baseado no *Transportation Research Board* (TRB, 2010), o qual estabelece que o limite de uma rodovia de pista dupla, em condições ideais, pode chegar a 3.200 ucp/hora. Dessa forma, converteu-se o parâmetro para ucp/dia, obtendo o valor de 76.800 ucp/dia. Apesar de as rodovias brasileiras em sua grande maioria não estarem em condições ideais de tráfego, utilizou-se esse valor por não ter sido encontrado um dado disponível para o caso brasileiro.

Os parâmetros relativos às quantidades de quilômetros rodados por ano para cada tipo de veículo foram obtidos no 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, o qual estima, por meio da idade média do veículo, a quantidade de quilômetros que ele trafega por ano

(BRASIL, 2011). Para fins de simplificação do modelo, utilizou-se uma idade média para cada tipo de veículo. Essa consulta foi feita no site do Denatran o qual fornece a idade média dos diferentes veículos que compõem a frota brasileira. Para ônibus e caminhões, a idade média foi de 14 anos, motos e carros, 9 anos (DENATRAN, 2018).

A variação de veículos circulantes ao longo do período de 2000 a 2016 foi obtida a partir da série histórica da composição da frota brasileira disponível para consulta on-line no *site* do Denatran (<https://www.denatran.gov.br/frota.htm>).

8.3 SUBMODELO C

A fim de quantificar o percentual da frota que utiliza cada tipo de combustível, utilizou-se a série histórica de utilização dos combustíveis disponibilizada pela Empresa de Pesquisa Energética no período de 2000 a 2016 com base nos Balanços Energético Nacional (EPE, 2000 a 2017). Dessa forma, foi possível estimar qual a porcentagem de veículos utiliza GNV, gasolina, álcool anidro, álcool hidratado, diesel e biodiesel.

O consumo médio de cada combustível foi estimado com base no 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, bem como o fator de conversão de emissão de CO₂ para cada combustível utilizado (BRASIL, 2011).

Como simplificação e com base no 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (BRASIL, 2011), convencionou-se para a utilização de diesel e o biodiesel o consumo relativo a ônibus e caminhões, sendo o consumo utilizado de 7 km/l. Para o gás natural, o consumo médio estipulado foi com base no consumo de automóvel que é de 14 km/m³. A utilização de gasolina, foi calculado com média de consumo de automóveis, comerciais leves (foram descartadas essas categorias para diesel, por possuir uma quantidade inexpressiva na frota brasileira) e motos, sendo o consumo médio dos automóveis e comerciais leves 11,3 km/l e 40 km/l para as

motocicletas. O consumo de etanol anidro foi repetido com o da gasolina, pois o mesmo compõe a Gasolina vendida no Brasil. Para o etanol hidratado, considerou-se apenas o consumo de automóveis que para esse combustível é de 8 km/l (BRASIL, 2011).

8.4 SUBMODELO D

Os parâmetros relativos à densidade energética dos diferentes tipos de combustíveis foi baseado no Relatório Técnico de Quantificação de Emissões de GEE pelo Setor de Energia, o qual foi patrocinado pelo *Global Environment Facility* (GEF), por meio do *World Bank*, visando a quantificação e remoção das emissões dos gases do efeito estufa (PMSP, 2012).

9 TESTE DO MODELO

O modelo de simulação proposto se enquadra na categoria de modelagem quantitativa, pois envolve a formulação indutiva e a simulação do modelo, focada na compreensão das estruturas de estoque e fluxo e aplicada na representação de sistemas quantificáveis conforme proposto em Zagonel e Corbet (2006). Conforme apresentado no Subcapítulo 4.2, os testes mais apropriados para esta categoria de modelagem são: conservação física ou avaliação da estrutura, consistência dimensional e erro de integração; teste de condições extremas, avaliação de parâmetros; teste endógeno de reprodução de comportamentos e teste de adequação de limites. Estes testes são apresentados a seguir.

9.1 TESTE DE CONSERVAÇÃO FÍSICA

O teste de conservação física centra-se no nível de agregação e na conformidade do modelo às realidades físicas básicas, como as leis de conservação. Uma violação comum das leis físicas envolve estoques que se tornam negativos, no entanto, estoques como matéria-prima e população, por exemplo, não podem ser negativos e, portanto, os fluxos de saída desses estoques devem ser nulos quando o estoque é nulo (Sterman, 2000).

Isso quer dizer que deve existir um *feedback* negativo de primeira ordem para restringir os fluxos de saída, de modo que o fluxo seja zero quando o estoque for zero. O *feedback* negativo provoca o comportamento de equilíbrio do sistema, ou seja, impõe-se um limite ao decrescimento exponencial. Por exemplo, se o estoque tende a cair exponencialmente, limita-se a taxa de saída de modo que o estoque não se torne negativo. Já a ordem de um sistema é o número de variáveis de estado, ou estoques, que este contém. Um sistema de primeira ordem contém apenas um estoque. Como cada variável de estoque possui um atraso associado, esses loops devem ser de primeira ordem, pois qualquer atraso no tempo pode fazer com que a taxa de saída continue, mesmo após o estoque chegar a zero, uma impossibilidade física (Sterman, 2000).

Os testes de avaliação da estrutura são realizados usando diagramas dos subsistemas e os mapas de estoque e fluxo, além da inspeção direta das equações. Outra técnica para testar a adequação dos pressupostos de agregação é desenvolver um submodelo mais detalhado, em seguida, comparar seu comportamento com o da formulação mais agregada. Quando a desagregação não afeta significativamente os resultados do modelo e as implicações políticas, o modelo original e mais simples pode ser mantido (Sternan, 2000).

No processo de formulação do modelo, foi realizado o teste de consistência física. Um exemplo, pode ser observado no Gráfico 1. Ao zerar o fluxo “construir” do modelo, o estoque “Infraestrutura” não é zerado em nenhum momento ao longo da série história avaliada.

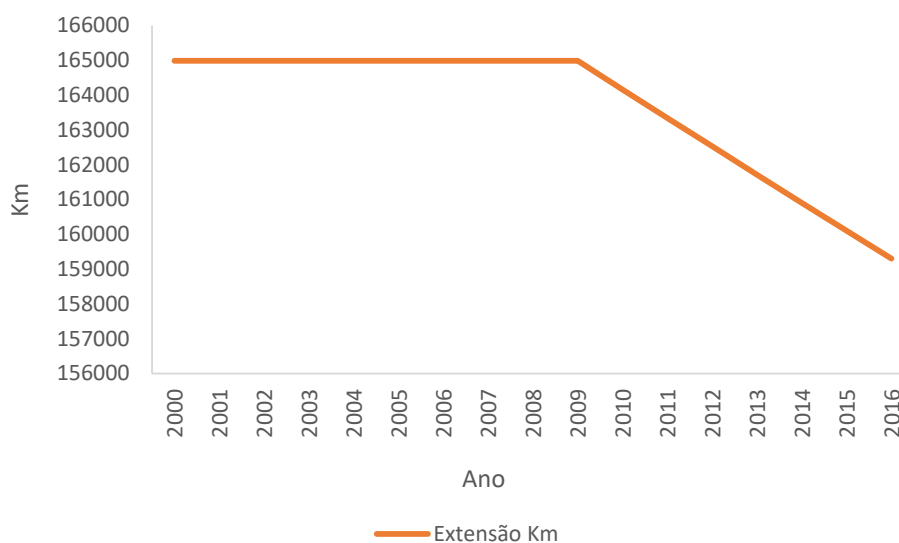


Gráfico 1 – Teste consistência física estoque de infraestrutura.
Fonte: Elaborado pela autora.

9.2 CONSISTÊNCIA DIMENSIONAL

O teste de consistência dimensional refere-se à verificação direta e sistemática de todas as equações e variáveis, no intuito de checar as unidades utilizadas e a paridade das relações entre as variáveis. Vale ressaltar que o modelo não

apresentaria qualquer resultado caso as relações e suas unidades estivessem inadequadas. Esse teste pôde ser realizado por meio da ferramenta de checagem de unidades (*units check*) e checagem do modelo (*check model*), oferecidas pelo próprio software *Vensim PLE*.

9.3 ERRO DE INTEGRAÇÃO

O teste de erro de integração consiste em verificar a sensibilidade dos resultados quando da variação dos intervalos de tempo de simulação (*time step*). Essa variação pode ser feita ao dividir sistematicamente o *time step* por dois. A Tabela 1 apresenta, como ilustração, os valores de saída da variável CO₂ emitido pelo modo para o ano de 2016.

Tabela 1 - Valores de Infraestrutura em 2016 para diferentes intervalos de tempo

Ano	Time Step (anos)	CO ₂ emitido pelo modo(kgCO ₂)	Varição (%)
2016	1	2.85x10 ¹²	
	0,5	2.92x10 ¹²	0,23%
	0,25	2.97x10 ¹²	0,16%
	0,125	2.98x10 ¹²	0,03%

Fonte: Elaborado pela autora.

Apesar de apresentarem resultados distintos, o comportamento da variável se altera pouco, independentemente do intervalo de tempo, como pode ser visto no Gráfico 2. Dessa forma, segundo Sterman (2000), quando não há divergências significativas para distintos passos de tempo, sugere-se a simulação sob um *time step* de 0,25, sendo esse o utilizado neste trabalho.

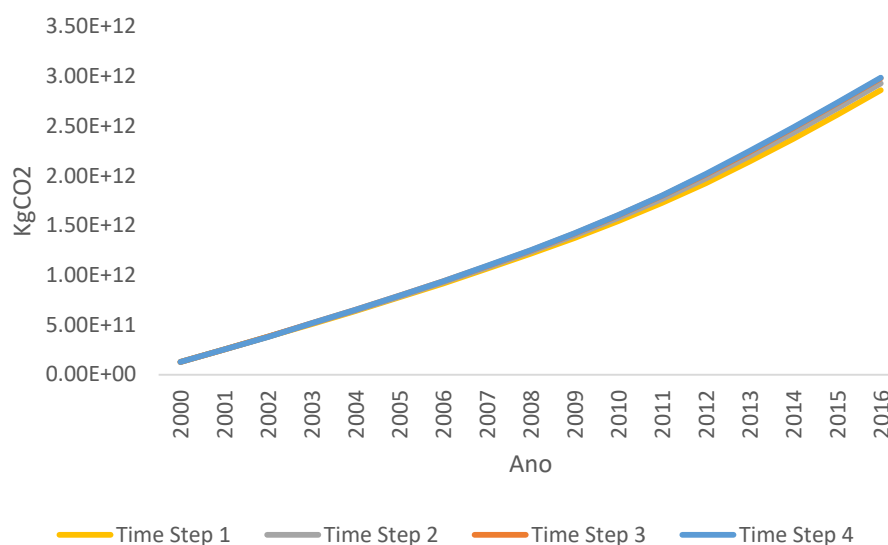


Gráfico 2 - Comportamento da CO₂ emitido pelo modo entre 2000 e 2016 para diferentes *times steps*.
 Fonte: Elaborado pela autora.

9.4 TESTE DE CONDIÇÕES EXTREMAS

Esse teste tem como objetivo levar o modelo a algumas condições extremas, como a total falta ou excesso de determinada variável. Para tanto foram escolhidas as seguintes variáveis para esse teste: frota circulante e % anual de investimento em infraestrutura. O objetivo foi testar o comportamento do modelo para valores nulos ou extremamente altos.

Em primeira instância foi atribuído às variáveis de variação de veículos o valor de zero. Observou-se que tanto o estoque de Emissão de CO₂, quanto consumo energético permaneceram com o valor de zero para todos os anos. **O Erro! Fonte de referência não encontrada.**, ilustra o teste realizado.

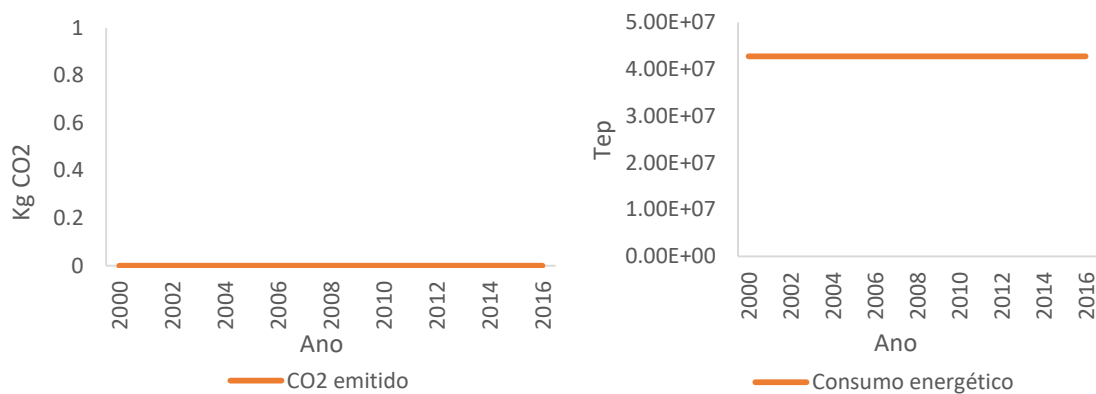


Gráfico 3 – Teste condição extrema influência sob o estoque CO₂ e consumo energético.

Fonte: Elaborado pela autora.

Para a variável % anual de investimento em infraestrutura foi atribuído o valor de 100%, o que significa dizer que todo o valor do PIB será investido em infraestrutura. O Gráfico ilustra o comportamento do estoque de infraestrutura após condição extrema aplicada. Assim, pode-se dizer que o modelo apresentou respostas esperadas para o teste de condições extremas.

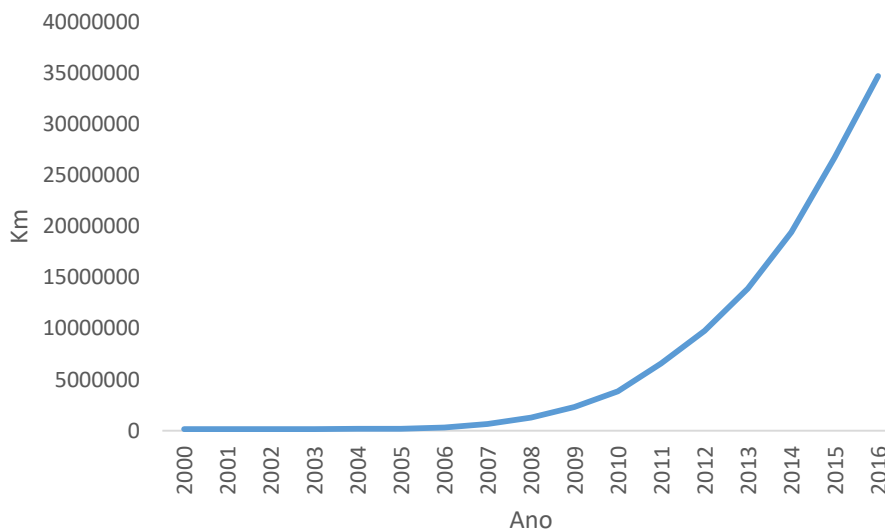


Gráfico 4 – Teste condição extrema influência sob estoque Infraestrutura
 Fonte: Elaborado pela autora.

9.5 AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS

Antes de decidir como um parâmetro deve ser estimado ou se seu valor é razoável, deve haver uma certificação de cada constante (e variável) para avaliar se possuem um significado claro e real. Em seguida, decide-se como estimar os valores de cada parâmetro (STERMAN, 2000).

Ao mesmo tempo, limitações na disponibilidade de dados numéricos significam que muitas vezes é impossível estimar todos os parâmetros em um modelo. Dessa forma, deve-se estimar os parâmetros de maneira criteriosa, usando a opinião especializada obtida por meio de entrevistas, *workshops*, materiais de arquivo, experiência direta e outros métodos (STERMAN, 2000).

Na prática, métodos estatísticos e de julgamento são usados em conjunto. Conhecimento do sistema real restringe o intervalo plausível para muitos parâmetros; a estimativa estatística fornece uma verificação das estimativas de julgamento. Em um modelo grande, geralmente é impraticável estimar todos os parâmetros críticos simultaneamente. Mesmo quando possível, a estimativa simultânea pode levar a problemas, uma vez que modelos grandes são frequentemente identificados (ou seja, mais de um conjunto de valores de parâmetros se ajustam igualmente bem aos dados). Nesses casos, estimativas críticas baseadas no conhecimento do sistema são essenciais na seleção de parâmetros razoáveis (STERMAN, 2000).

A significância estatística dos parâmetros que relacionam variáveis em uma equação não é um indicador da exatidão do relacionamento. Significância estatística indica quão bem uma equação se ajusta aos dados observados; não indica se um relacionamento caracteriza corretamente as relações causais no mundo real. Usar significância estatística somente como teste de validade de modelo também pode levar os modeladores a rejeitar equações que descrevam relacionamentos importantes. Um relacionamento pode ser estatisticamente insignificante simplesmente porque há poucos pontos de dados ou porque os dados não variam o suficiente. Quando o conhecimento direto do sistema sugere que um relacionamento é real e importante, você deve incluí-lo, usando seu

melhor julgamento para estimar seus valores, mesmo que os dados numéricos não permitam estimar sua força (STERMAN, 2000).

Dessa forma, na tentativa de relacionar matematicamente o PIB com a variação anual da frota de veículos, não foi possível inseri-la no modelo, pois não foi encontrada relação matemática dentro do escopo do problema estudado, uma vez para que fosse possível, seria necessário considerar diversos fatores de cunho econômico, o que afastaria o problema do viés definido. A Tabela 2 - Teste correlação entre PIB e frota de veículos. mostra a variação de ambos parâmetros no período de 2000 a 2016.

Tabela 2 - Teste correlação entre PIB e frota de veículos.

Ano	PIB (R\$) x 10 ⁶	% crescimento	Frota de veículos	% crescimento
2000	1.199.092		29.722.950	
2001	1.315.755	10%	31.913.003	7%
2002	1.488.787	13%	35.523.633	11%
2003	1.717.950	15%	36.658.501	3%
2004	1.957.751	14%	39.240.875	7%
2005	2.170.584	11%	42.071.961	7%
2006	2.409.449	11%	45.372.640	8%
2007	2.720.262	13%	49.644.025	9%
2008	3.109.803	14%	54.506.661	10%
2009	3.333.039	7%	59.361.642	9%
2010	3.885.847	17%	64.817.974	9%
2011	4.376.382	13%	70.543.535	9%
2012	4.814.760	10%	76.137.191	8%
2013	5.331.619	11%	81.600.729	7%
2014	5.778.953	8%	86.700.490	6%
2015	6.000.570	4%	90.686.936	5%
2016	6.266.894	4%	93.867.016	4%

Fonte: Elaborado pela autora.

Outro teste realizado, com o objetivo de incluir parâmetros que relacionassem as variações anuais acumuladas do transporte de cargas e do PIB, foi realizado. Porém não foi identificada correlação matemática, apesar de seguirem uma tendência, conforme ilustrado no Gráfico 4.

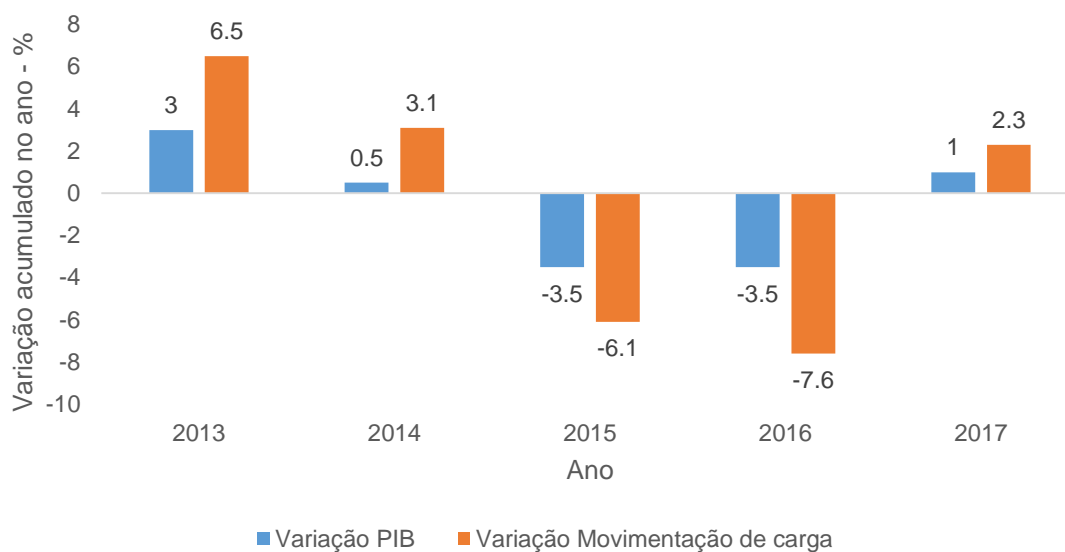


Gráfico 4 – Teste relação entre variação anual acumulada da movimentação de carga e PIB no Brasil no período de 2013 a 2017.
 Fonte: Elaborado pela autora.

9.6 TESTE ENDÓGENO DE REPRODUÇÃO DE COMPORTAMENTO

Um modelo é não uma réplica perfeita da estrutura, condições e parâmetros iniciais do sistema real. Portanto, o resultado da simulação não será idêntico desde que o modelo seja conduzido exatamente pelos mesmos eventos aleatórios que o sistema real (STERMAN, 2000).

Apesar disso, um bom modelo deve exibir os mesmos modos de comportamento observados nos dados, como flutuações, frequências e amplitudes. Assim, deve-se traçar os dados simulados e reais juntos para analisar se o modelo captura as assimetrias e outras características sutis do comportamento observado nos dados. Testes de reprodução comportamental não podem comprovar que um modelo é correto ou confiável, mas auxilia a descoberta de falhas na estrutura ou parâmetros do modelo e avalia se eles são relevantes em relação ao propósito pretendido (Sterman, 2000).

O Gráfico 5 mostra o comportamento da Emissão de CO₂ real e aquela obtida pelo modelo no período analisado. Pode-se visualizar a diferença entre o real e a simulação no período simulado. Essa diferença é esperada devido ao fato de

estimar uma média anual de quilômetros rodados para cada tipo de veículo que compõe a frota brasileira, a fim de simplificar o modelo proposto. Isso implica dizer que o modelo amplifica em 3% o efeito da emissão de CO₂ em 10 anos, que é o horizonte a ser simulado. Contudo, o comportamento nos dois casos reflete o aumento das emissões ao longo do período analisado. A diferença de intensidade deste aumento servirá de base para a análise dos cenários simulados.

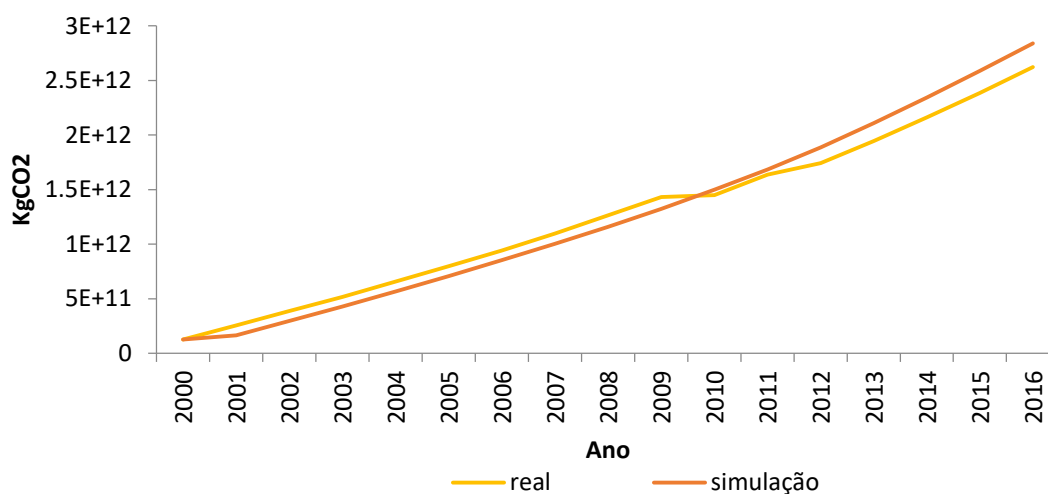


Gráfico 5 – Comparativo entre os dados reais e simulação da emissão de CO₂ do modo rodoviário.

Fonte: Elaborado pela autora.

Comportamento semelhante é observado no consumo energético (Gráfico 6). Apesar de haver algumas diferenças, devido aos mesmos motivos explicados na emissão de CO₂, o comportamento em ambos os casos é semelhante. No período de 10 anos a amplificação é de 11% da simulação em relação ao real. Essa diferença será levada em consideração ao analisar os cenários.

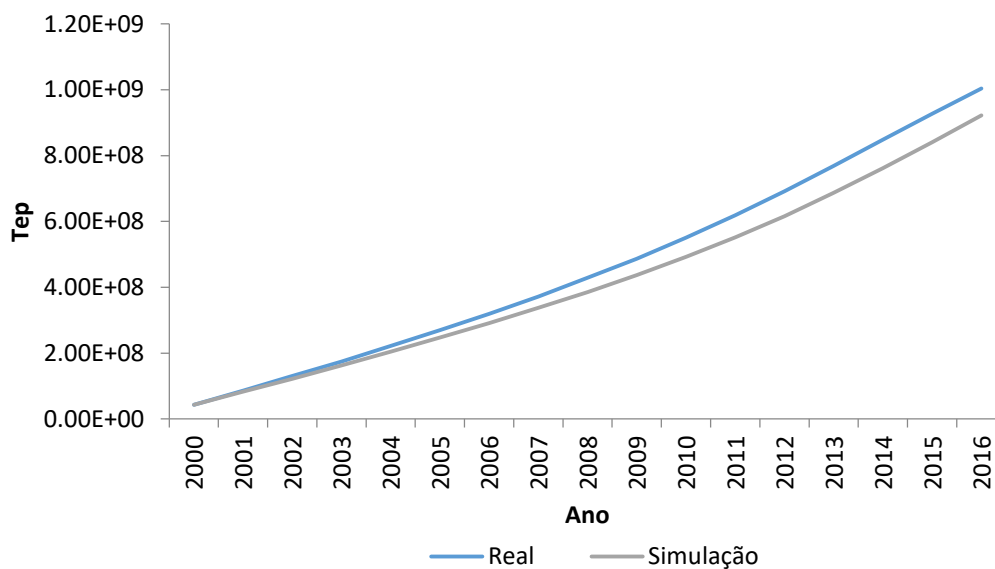


Gráfico 6 – Comparativo entre os dados reais e simulação do consumo energético do modo rodoviário.
 Fonte: Elaborado pela autora.

Como relação à infraestrutura, tentou-se aproximar o valor da simulação com o valor real com base de dados encontrados em Bock (2016), como valores de desgaste da infraestrutura de acordo com o fluxo que a rodovia recebe. Porém, ao simular, o comportamento do gráfico destoava com o que ocorre na realidade. Essa diferença se dá pelo fato de que normalmente, o fluxo é estimado por meio de medição de veículos em trechos delimitados de uma rodovia, o que no caso da presente dissertação é inviável, pelo fato dela ser trabalhada em nível macro, ou seja, com toda extensão de rodovias pavimentadas do Brasil. O Gráfico 7, ilustra o teste realizado.

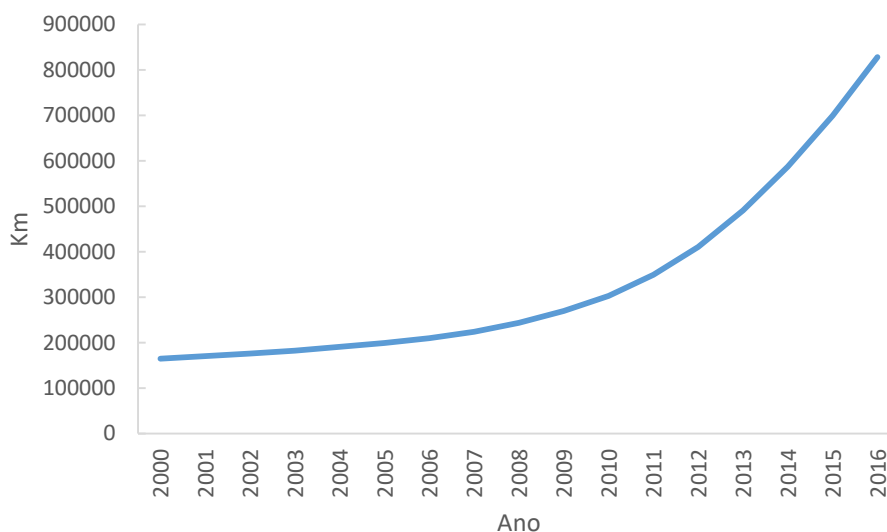


Gráfico 7 – Teste adequação estoque infraestrutura.
 Fonte: Elaborado pela autora.

Dessa forma, para que pudesse haver uma simulação mais fiel com o que ocorre na realidade, convencionou o desgaste da rodovia em 0,05% da infraestrutura existente para cada ano em que houvesse sobrecarga das rodovias (Gráfico 8).

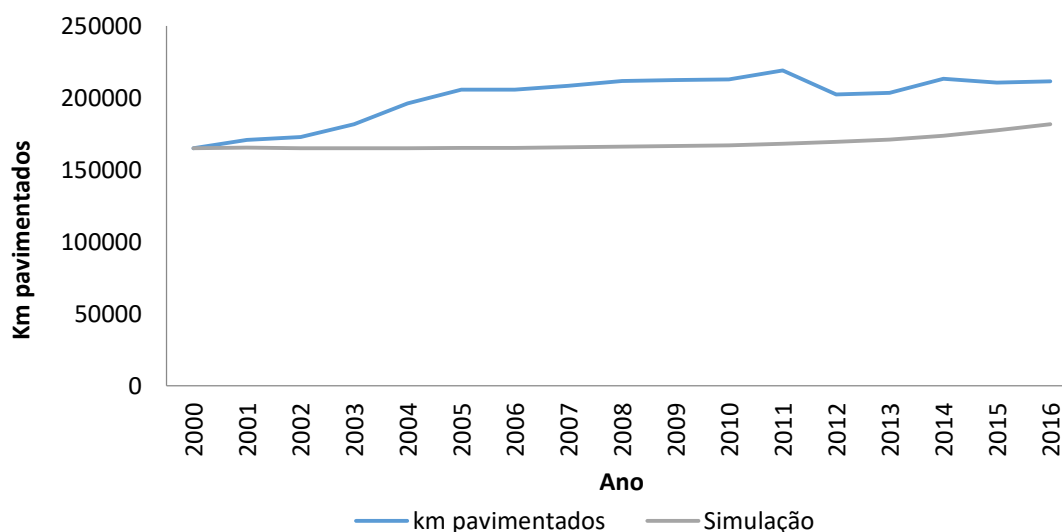


Gráfico 8 - Comparativo entre os dados reais e simulação da infraestrutura do modo rodoviário.
 Fonte: Elaborado pela autora.

9.7 TESTE DE ADEQUAÇÃO DE LIMITES

Testes de adequação de limites avaliam a adequação do limite do modelo para o propósito definido. Dessa maneira, pode-se inspecionar diretamente as equações do modelo, mas os diagramas de relação causal e de estoque e fluxo ajudam na assimilação de constantes exógenas que deveriam ser consideradas variáveis do modelo. Além disso, se uma estrutura adicional possui um impacto significativo sobre o comportamento ou implicações políticas, esta deve ser incluída como parte integrante do modelo (STERMAN, 2000).

No modelo proposto, na parte que se refere à frota de veículos, inicialmente a quantidade quilômetros rodados pela frota era constante para o cálculo da variável “Km rodado pela frota”. Porém, esse dado é fundamental para o cálculo das emissões de CO₂ e consumo energético do modelo. Dessa forma, optou-se por inseri-la como variável que pode ser alterada conforme o cenário avaliado.

Após os testes e adequações do modelo, o próximo capítulo apresenta os cenários propostos para sua simulação.

10 CENÁRIOS PROPOSTOS

A partir do modelo testado, devidamente parametrizado e com apoio de dados passados, podem-se estabelecer cenários analíticos para os submodelos propostos. Os cenários propostos buscam avaliar alterações nos seguintes subgrupos: PIB, investimentos em infraestrutura rodoviária, investimentos em pavimentação de rodovias, frota de veículos, porcentagem de veículos por tipo de combustível, valor adicionado do setor de transporte e política de percentual de 10% de participação do biodiesel no diesel (B10).

O subgrupo de cenário do PIB refere-se aos cenários os quais os valores anuais do PIB foram variados. O primeiro cenário, o qual foi chamado de cenário base, servirá de referência para comparação dos demais cenários, por se tratar de previsão do governo para os próximos 10 anos. Esse cenário considerou um crescimento anual médio do PIB de 2% para os próximos 10 anos (IBGE, 2017). Os demais parâmetros do modelo foram preenchidos com a média dos valores históricos das variáveis dos anos de 2000 a 2016. No Cenário 1, o valor do PIB não sofreu alteração ao longo dos anos, ou seja, representa uma estagnação da economia. As demais variáveis permaneceram inalteradas. O Cenário 2, buscou-se projetar uma perspectiva otimista, em que o PIB brasileiro tem um crescimento de 3,2% ao ano nos próximos 10 anos. Por último, foi proposto o Cenário Pessimista, o qual a variação do PIB anual é de 1% de crescimento ao ano. As demais variáveis continuaram com os valores inalterados.

No subgrupo Investimentos em Infraestrutura Rodoviária, foram estabelecidos mais dois cenários. O Cenário 3 considerou o menor valor investido em porcentagem do PIB dos anos de 2000 a 2016 e projetou este percentual para os próximos 10 anos. As demais variáveis, continuaram com os valores estabelecidos de acordo com o cenário base. No Cenário 4, por outro lado, projetou-se o maior percentual de investimento da série história. O subgrupo extensão de rodovias pavimentadas seguiu o mesmo raciocínio do subgrupo anterior: no Cenário 5 foi projetado o menor investimento realizado na série

histórica analisada, enquanto o Cenário 6, propõe o maior patamar de investimento.

No subgrupo Frota de Veículos, foram propostos mais dois cenários, em que a variação do número de veículos foi modificada. No Cenário 7 foram considerados os menores patamares de crescimento no período de 2000 a 2016 para cada tipo de veículo constante no modelo. Esse valor foi replicado para o período de simulação estipulado e as demais variáveis, assim como nos outros subgrupos, permaneceram de acordo com o cenário base estabelecido. No Cenário 8 lógica semelhante foi aplicada, porém, ao invés de considerar os menores patamares de crescimento, utilizou-se as maiores projeções de crescimento de cada categoria de veículos.

No subgrupo porcentagem de veículos por tipo de combustível, os dados alterados foram os percentuais de participação de cada combustível. No Cenário 9, para todos os combustíveis foi utilizado o menor percentual ocorrido na série histórica analisada para cada tipo de combustível. Já no cenário 10, os valores considerados foi o maior percentual de participação dos combustíveis.

No subgrupo valor adicionado pelo setor de transporte, foram propostos três cenários, em que somente a variável VAT% foi modificada. No Cenário 11, foi projetado para os próximos 10 anos o mesmo valor percentual do ocorrido em 2016. No Cenário 12, foi simulado um decréscimo de 0,15% ao ano no percentual, com o intuito de manter a tendência observada na série histórica dessa variável. Por último, no Cenário 13, o maior valor observado na série histórica analisada foi projetado para os próximos 10 anos.

No penúltimo subgrupo, o qual refere-se à política de composição do Diesel, no Cenário 14 foi simulada a alteração na composição do diesel, a qual por meio da Lei 13.263, de 23 de março de 2016, estabelece que a partir de 2018 o percentual de composição do biodiesel no diesel aumente de 8% para 10%.

O último cenário proposto (Cenário 15), refere-se à simulação da inserção de veículos híbridos na frota brasileira de forma progressiva. Para essa simulação,

os valores da variação anual de veículos foram baseados no relatório do *The Boston Consulting Group* - BCG (MOSQUET et al, 2018), os demais parâmetros permaneceram conforme o Cenário Base. Esse relatório apresenta a tendência mundial de vendas de veículos por tipo de combustível para os próximos anos. O Quadro 5 apresenta os percentuais utilizados na variação da frota no modelo proposto.

Quadro 5 – Variação anual de veículos Cenário 15

Ano/Veículos	Veículos Gasolina	Veículos Diesel
2017	0%	0%
2018	1%	-2.50%
2019	1%	-2.50%
2020	-1.80%	-0.80%
2021	-1.80%	-0.80%
2022	-1.80%	-0.80%
2023	-1.80%	-0.80%
2024	-1.80%	-0.80%
2025	-1.80%	-0.80%
2026	-1.80%	-0.80%

Fonte: BCG (2018).

Na Tabela 3 estão resumidos todos os cenários citados. Os valores relativos à cada cenário, podem ser verificados no Apêndice C

Tabela 3 – Resumo dos cenários propostos

Cenário	Pessimista	Estagnado	Otimista
Base (PIB)		x	
1 (PIB)	x		
2 (PIB)			x
Pessimista (PIB)	X		
3 (Inv. Inf.)	x		
4 (Inv. Inf.)			x
5 (Pav.)	x		
6 (Pav.)			x
7 (frota)	x		
8 (frota)			x
9 (combustíveis)	x		
10 (combustíveis)			x
11 (PIB transporte)	x		
12 (PIB transporte)		Tendência de comportamento	
13 (PIB transporte)			x
14 (B10)	Alteração na quantidade de biodiesel misturado ao diesel (10%)		
15	Inserção de veículos híbridos frota de veículos		

Fonte: Elaborado pela autora.

11 RESULTADOS

Para melhor compreensão e análise dos resultados, dividiu-se esse capítulo em 6 subgrupos conforme divisão realizados nos cenários propostos ilustrados no Capítulo 8. Ao final, foi feita uma análise de comparação entre os cenários.

11.1 SUBGRUPO 1: PIB

No primeiro subgrupo, os valores do PIB foram variados (Cenários 1, 2 e pessimista) e comparados com o Cenário base. Em relação à infraestrutura, a variação nos valores do PIB tem pouca interferência na quantidade de quilômetros pavimentados, sendo até 2022, quase inexistente quando comparados os Cenários base, 1 e 2. Esse fato deve-se aos percentuais de investimentos em infraestrutura rodoviária e de pavimentação que permaneceram constantes nos cenários simulados, o que indica que um

aumento no PIB não implicará diretamente no aumento de rodovias pavimentadas, visto que tanto no Cenário 1 (pessimista), quanto no Cenário 2 (otimista) e Cenário Pessimista houve aumento semelhante da quantidade de quilômetros pavimentados conforme ilustrado no Gráfico 9.

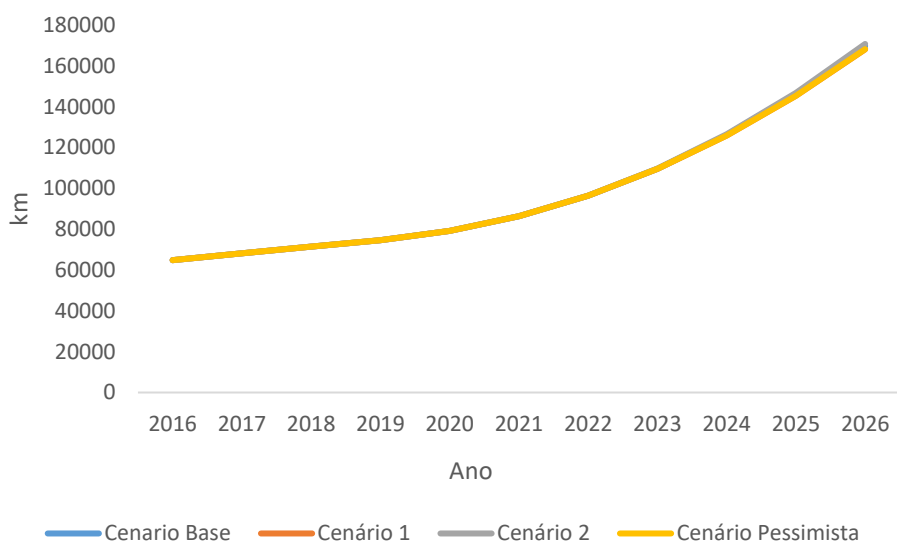


Gráfico 9– Comportamento infraestrutura nos cenários base, 1, 2 e pessimista.
Fonte: Elaborado pela autora.

Em relação à emissão de CO₂, e o consumo energético de acordo com o modelo proposto, não foi observada nenhuma alteração para os diferentes cenários simulados relacionados com as variações no PIB, conforme Gráfico 10 e Gráfico 11.

Esse comportamento é esperado, pois no modelo não foi possível quantificar a relação entre PIB e frota de veículos, conforme explicado no Capítulo 9. Esses dois fatores não apresentaram relação de causalidade quando estudados no escopo do problema proposto, o que impossibilitou o equacionamento dessa relação, uma vez para que fosse possível, seria necessário considerar diversos fatores de cunho econômico, o que afastaria o problema do viés definido.

Contudo, apesar da variação do PIB proposta nos diferentes cenários simulados, nota-se um crescimento no consumo energético e conseqüentemente, na quantidade de CO₂ emitida pelo modo, representando em termos numéricos um

acréscimo de 7,5% no nível de emissão em 10 anos. De acordo com EPE (2017), a previsão no aumento do consumo energético é de 5% para os próximos 10 anos, portanto, caso a frota de veículos continue aumentando nos patamares atuais e caso medidas mitigadoras de consumo energético não sejam tomadas é possível que esse consumo energético seja ainda maior.

Esse resultado vai de encontro com a meta estabelecida pelo governo federal na cúpula da ONU (União das Nações Unidas) sobre desenvolvimento sustentável em 2015, em que o país se comprometeu a reduzir em 43% a emissão de gases do efeito estufa até 2030. Vale destacar que o setor de transporte no ano de 2016 representou 45,3% das emissões totais de CO₂ no Brasil, sendo o modo rodoviário responsável por 92% das emissões do setor (EPE, 2017), o que demonstra a importância do mesmo nos indicadores de emissão nacional. Portanto, ações que minimizem o impacto deste modo nas emissões devem ser planejadas para não comprometer o alcance desta meta.

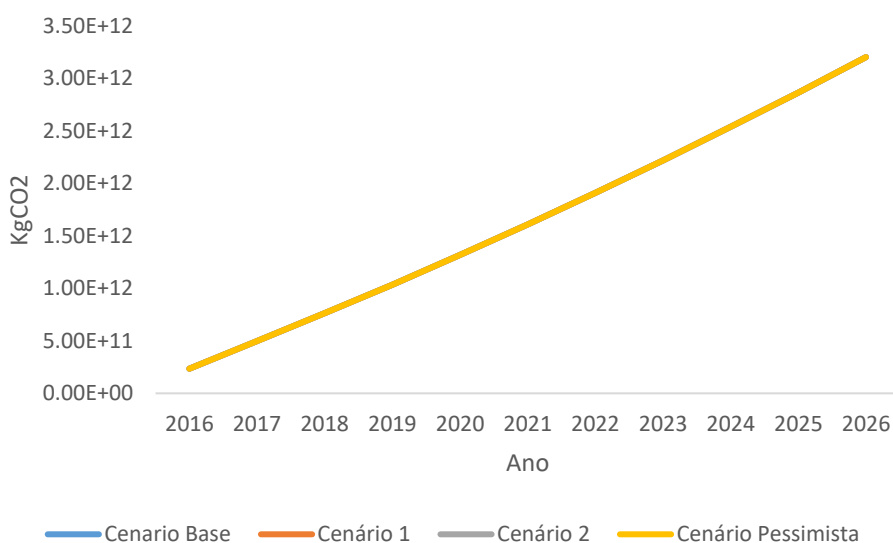


Gráfico 10 – Comportamento Emissão de CO₂ nos cenários base, 1, 2 e pessimista.

Fonte: Elaborado pela autora.

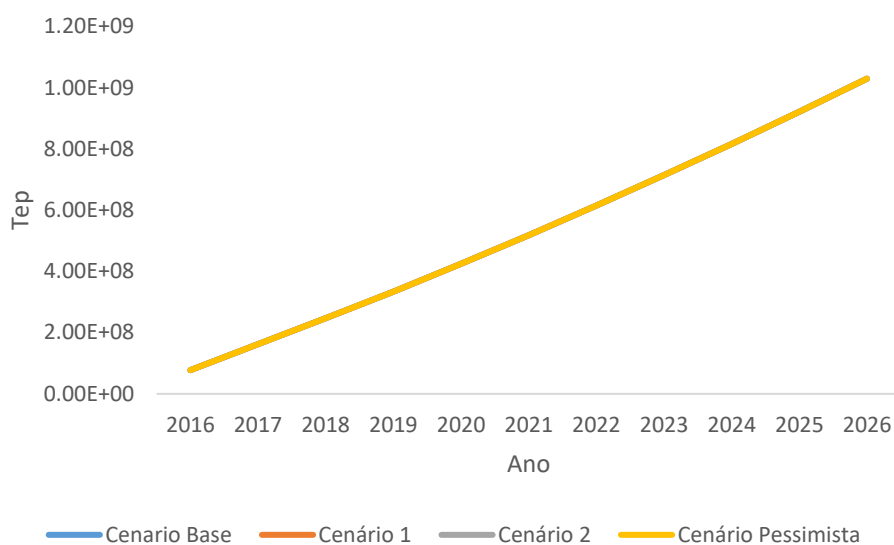


Gráfico 11 – Comportamento Consumo Energético nos Cenários base, 1, 2 e pessimista.

Fonte: Elaborado pela autora.

Todavia, a variável Intensidade Energética para os diferentes cenários é distinta ao longo do período simulado (Gráfico 12). A partir de 2019, o Cenário 2 (otimista) atinge menores patamares, indicando que o setor de transporte é mais eficiente, ou seja, adiciona mais valor ao PIB mantendo o mesmo consumo energético dos demais cenários.

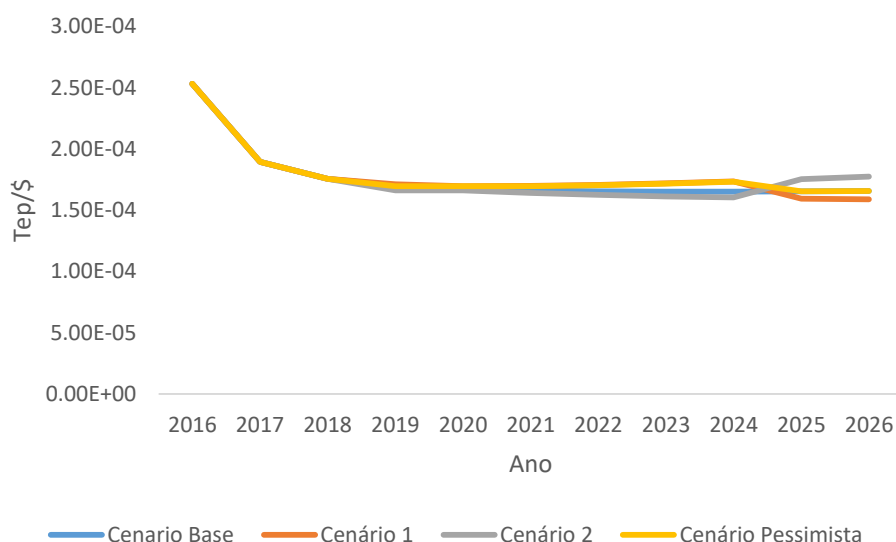


Gráfico 12 – Intensidade Energética para os Cenários base, 1, 2 e pessimista.
 Fonte: Elaborado pela autora.

11.2 SUBGRUPO 2: INVESTIMENTO EM INFRAESTRUTURA

No segundo subgrupo, foram variados os parâmetros de investimentos em infraestrutura rodoviária (Gráfico 13).

No Cenário 3 percebe-se uma retração na quantidade de quilômetros pavimentados em relação ao Cenário Base. Em 2026 tem-se 152.523 quilômetros pavimentados no Cenário 3, contra 169.757 quilômetros de rodovias pavimentadas do Cenário Base, ou seja, uma diferença de 10% a menos na malha rodoviária pavimentada no Cenário 3. Assim, pode-se dizer que se investindo 1% do PIB ao ano em pavimentação de estradas, o crescimento na extensão de rodovias pavimentadas é desacelerado. De acordo com Chandran e Tang (2013) isso traz diversos prejuízos para a economia do país, dada a dependência existente pelo modo para transporte de cargas e passageiros. Essa desaceleração na evolução de rodovias pavimentadas acarretaria em perdas econômicas para o país, pois ocasionaria um aumento nos custos do frete, por exemplo.

Em termos numéricos, nota-se que no Cenário 4 (otimista), investindo-se 3% ao ano do PIB em infraestrutura rodoviária, é possível em 10 anos quase quadruplicar a quantidade de quilômetros pavimentados considerando que a extensão rodoviária do país permaneça a mesma de 2016. Esse fator torna o setor mais eficiente e menos poluidor, visto que de acordo com Bartholomeu e Caixeta Filho (2008) a qualidade da rodovia gera um aumento em cerca de 6% no consumo de combustível, e conseqüentemente aumenta os níveis de emissão de CO₂.

Dessa forma, assim como apresentado no subgrupo anterior, os níveis de consumo energético e emissão de CO₂ não apresentaram diferenças em termo de comportamento. Porém, em termos numéricos percebe-se em todos os cenários uma tendência de crescimento, assim pode-se afirmar que a precariedade na infraestrutura também interfere nos níveis de consumo de energético, mesmo que com menor intensidade e mais indiretamente e, conseqüentemente, ocasiona aumento nos níveis de emissão de CO₂ (Gráfico 14 e Gráfico 15).

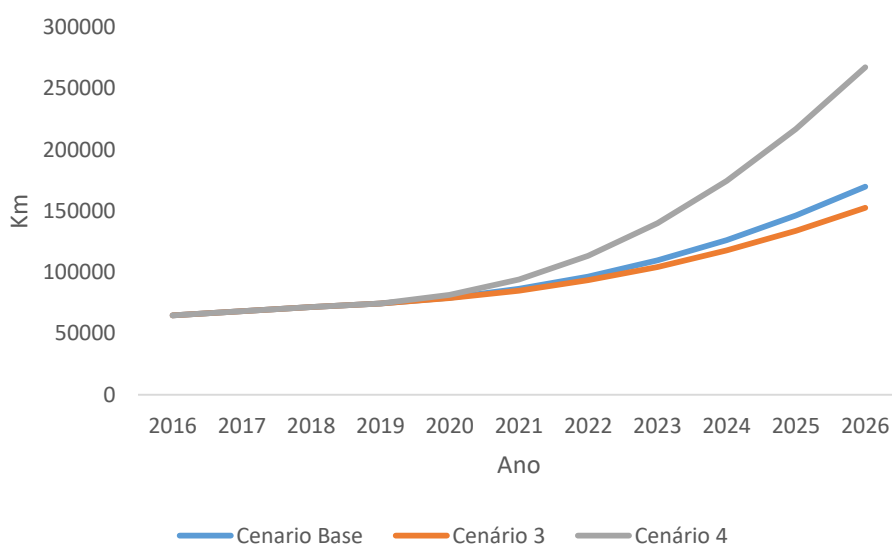


Gráfico 13 – Comportamento Infraestrutura nos Cenários base, 3 e 4.
Fonte: Elaborado pela autora.

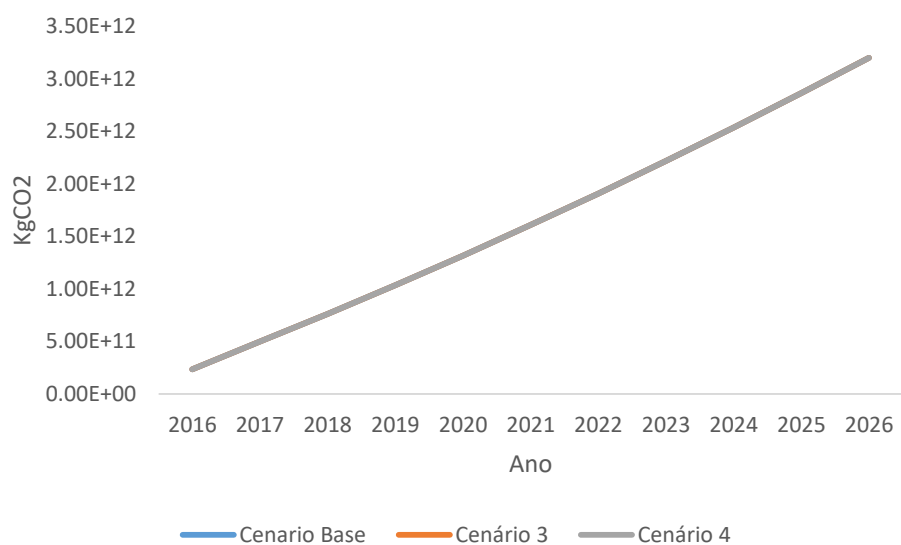


Gráfico 14 – Comportamento emissão de CO₂ nos Cenários base, 3 e 4.
 Fonte: Elaborado pela autora.

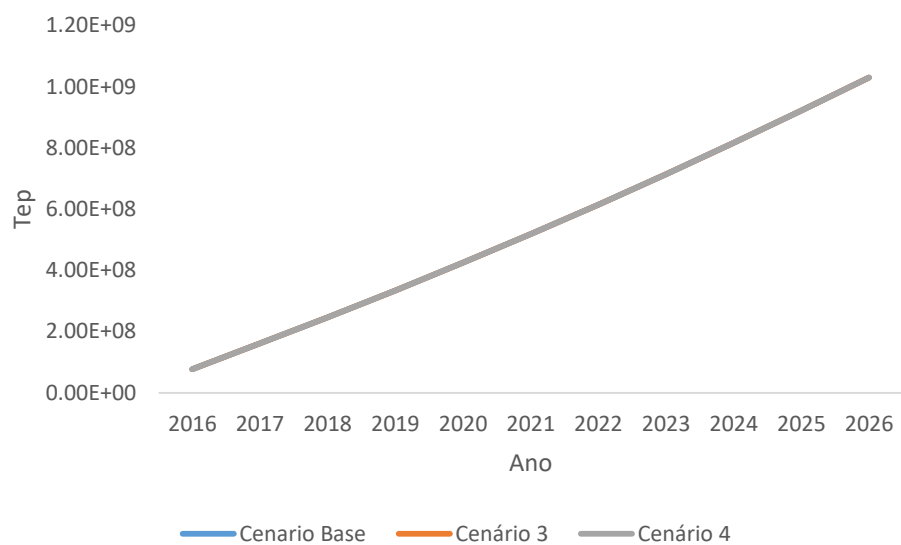


Gráfico 15 - Comportamento consumo energético nos Cenários base, 3 e 4.
 Fonte: Elaborado pela autora.

11.3 SUBGRUPO 3: EXTENSÃO DE VIAS PAVIMENTADAS

No terceiro subgrupo, a quantidade de quilômetros pavimentados foi alterada, pode-se notar comportamento similar ao observado no segundo subgrupo, ou seja, tem relação direta com a infraestrutura e mantém os níveis crescentes de emissão de CO₂ e consumo energético (Gráfico 16).

No Cenário 5 (pessimista) é observado um crescimento inexpressivo da extensão de quilômetros pavimentados. Em 10 anos, aumenta-se apenas 1% a extensão de rodovias pavimentadas. Isso significa que os patamares de investimentos nesse período seriam suficientes apenas para manter a infraestrutura existente, porém insuficientes para promover um desenvolvimento do modo.

No Cenário 6 (otimista), há aumento de 84% de extensão de rodovias pavimentadas no período simulado, caso sejam destinados 28,1% dos investimentos no modo rodoviário para pavimentação de rodovias. Isso ocasionaria um aumento de 10% na quantidade de quilômetros pavimentados considerando que a extensão rodoviária do país permaneça a mesma de 2016.

Dessa forma, assim como esperado, há uma relação direta entre infraestrutura e extensão da malha rodoviária. Porém, pode-se dizer que essa relação é menos relevante se comparada à apresentada no subgrupo anterior.

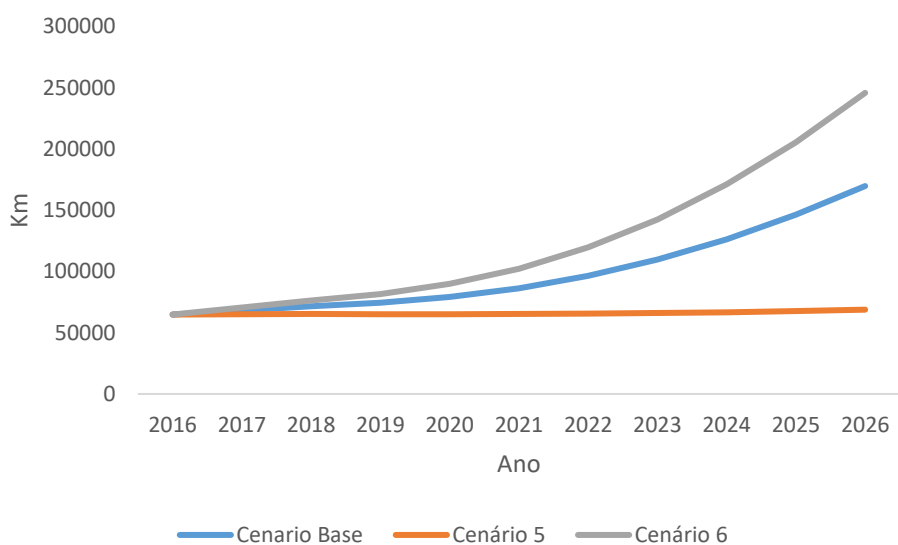


Gráfico 16 - Variações nos Investimentos em Pavimentações de Rodovias dos Cenários de base, 5 e 6.
 Fonte: Elaborado pela autora.

Assim como apresentado no subgrupo anterior, os níveis de consumo energético e emissão de CO₂ não apresentaram diferenças em termo de comportamento (Gráfico 17).

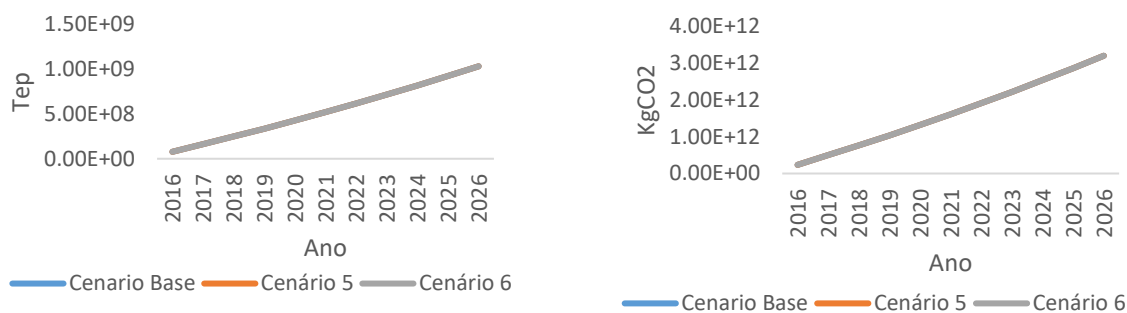


Gráfico 17 - Comportamento emissão de CO₂ e consumo energético nos Cenários base, 5 e 6.
 Fonte: Elaborado pela autora.

11.4 SUBGRUPO 4: FROTA DE VEÍCULOS

No quarto subgrupo, em que a frota de veículos foi variada, notou-se diferença entre os Cenários 7 e 8 simulados na emissão de CO₂, consumo energético e na intensidade energética.

Em relação à infraestrutura, não houve diferença nos cenários que compõem esse subgrupo (Gráfico 18). Isso ocorre devido ao fato de não haver variações muito grandes na frota entre os cenários. Além disso, os percentuais de investimentos em infraestrutura e pavimentação de rodovias foram mantidos conforme o Cenário base, o que demonstra que mesmo que a frota cresça no nível estabelecido, os investimentos médios praticados no Cenário base são suficientes para manter um crescimento na extensão de quilômetros pavimentados no período simulado.

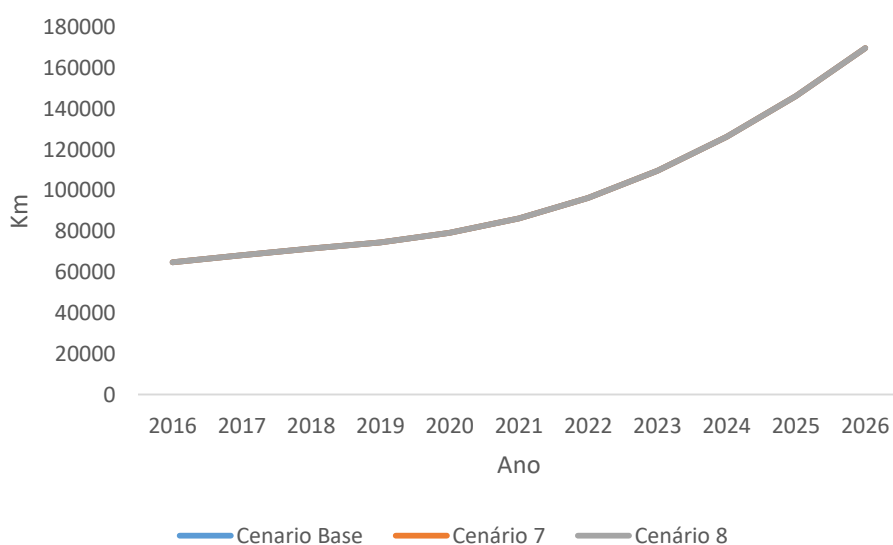


Gráfico 18 – Comportamento infraestrutura Cenários Base, 7 e 8.
Fonte: Elaborada pela autora.

Com relação à emissão de CO₂ e utilização energética nesses cenários, foi observado um aumento na quantidade de CO₂ emitida e no consumo energético no Cenário 8 frente aos outros cenários. Esse aumento tende a crescer mais rapidamente a partir do ano de 2022 (Gráfico 19 e Gráfico 20). Essa diferença

corroborar com a literatura de que a frota de veículos possui uma forte relação com os níveis de emissão de CO₂ e consumo energético no setor.

Em termos numéricos, e já corrigindo a amplificação que o modelo faz no período de 10 anos, ou seja, 3% de amplificação, no Cenário 7 (pessimista), há um aumento de 12 vezes na quantidade de emissão se comparado com os níveis de 2016. No Cenário 8 (otimista) esse aumento é ainda maior, de 14,5 vezes se comparado com os mesmos níveis de 2016. Esse cenário reforça a necessidade de investir em alternativas para o setor de transporte para que o Brasil consiga atingir suas metas de emissão, entre elas, investir em modais menos poluentes para que a dependência do modo rodoviário seja reduzida.

Vale destacar que algumas medidas para priorizar os modos não motorizados e coletivos de transporte em detrimento do transporte individual motorizado já foram realizadas, como a Política Nacional de Mobilidade Urbana, a qual por meio da Lei 12.587 de 3 de janeiro de 2012, visa contribuir para o acesso universal à cidade, o fomento e a concretização das condições que contribuam para a efetivação dos princípios, objetivos e diretrizes da política de desenvolvimento urbano, tendo como um de seus princípios básicos um desenvolvimento sustentável no âmbito ambiental.

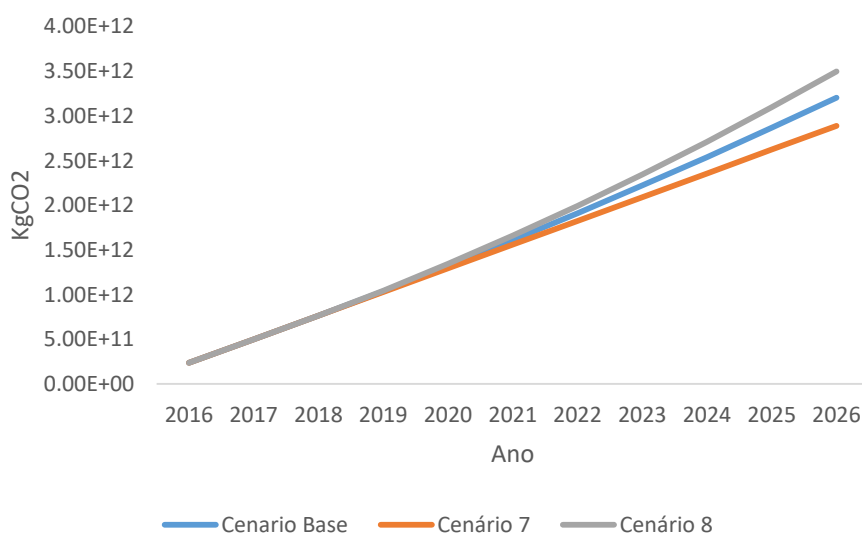


Gráfico 19 – Comportamento emissão de CO₂ nos Cenários 7 e 8.
Fonte: Elaborado pela autora.

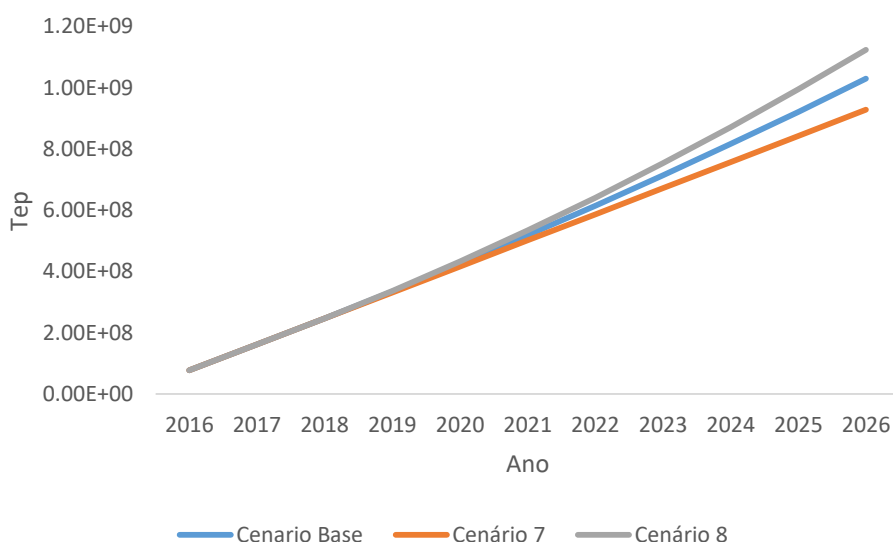


Gráfico 20 – Comportamento consumo energético Cenários 7 e 8.
 Fonte: Elaborado pela autora.

Com relação à intensidade energética, nota-se um comportamento inverso ao que ocorreu nos Cenários 1 e 2. No Cenário 8, que envolveu patamares mais elevados de crescimento da frota de veículos, a intensidade energética foi maior, evidenciado a perda em eficiência do setor, uma vez que um maior nível de energia será requerido para que seja adicionado valor do setor de transporte ao PIB do Brasil (Gráfico 21).

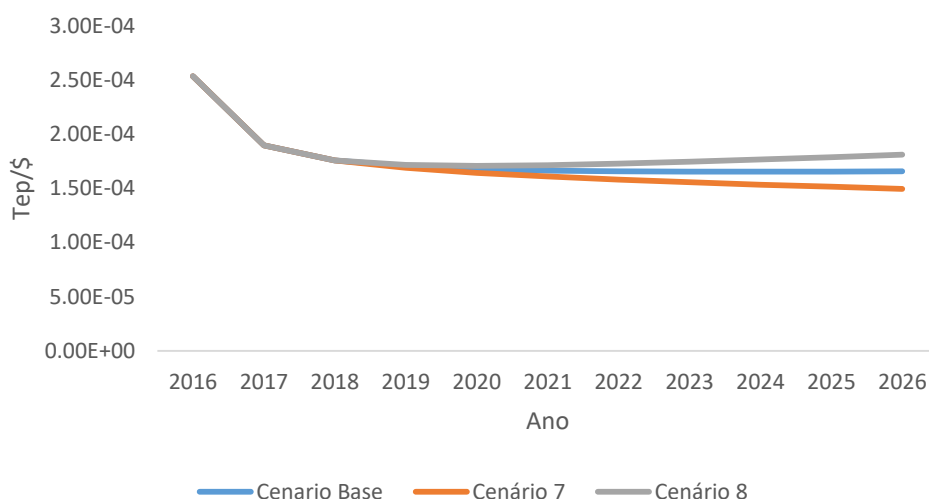


Gráfico 21 – Comportamento intensidade energética Cenários base, 7 e 8.
 Fonte: Elaborada pela autora.

11.5 SUBGRUPO 5: VEÍCULOS POR TIPO DE COMBUSTIVEL

No quinto subgrupo, em que foram variadas as porcentagens de utilização dos diferentes combustíveis utilizado no modo rodoviário, houve alterações entre os cenários que compõem esse subgrupo para o consumo energético, a emissão de CO₂ e na intensidade energética, conforme Gráfico 22, Gráfico 23 e Gráfico 24.

Em relação à utilização energética, em todos os cenários simulados nesse subgrupo, houve um crescimento no consumo de combustível, porém todos os cenários apresentaram patamares muito próximos, sendo que nos Cenários Base e no Cenário 10 a utilização energética foi igual para todo o período simulado. Em termos numéricos, descontando-se a amplificação do modelo, há um aumento de 21% de consumo energético no período de 10 anos no Cenário 10 e no Cenário Base e 12% no Cenário 9. Esse aumento no consumo energético, contribui para uma maior dependência por combustíveis fósseis, e conseqüentemente, uma maior emissão de CO₂.

Em relação às emissões de CO₂ também houve crescimento em todos os cenários do referido subgrupo, consequência da maior utilização energética. No Cenário 9, os níveis de emissão têm um aumento de 41% ao longo do período simulado, contra 58% de aumento observado no Cenário 10, já considerando a amplificação existente do modelo de 3%. Esses percentuais reforçam ainda mais a importância do Brasil em diversificar a utilização dos diferentes modais de transporte, visto que conforme mostrado há forte relação entre consumo de combustível e emissão de CO₂, afetando diretamente na capacidade do Brasil em cumprir as metas de emissão estabelecidas.

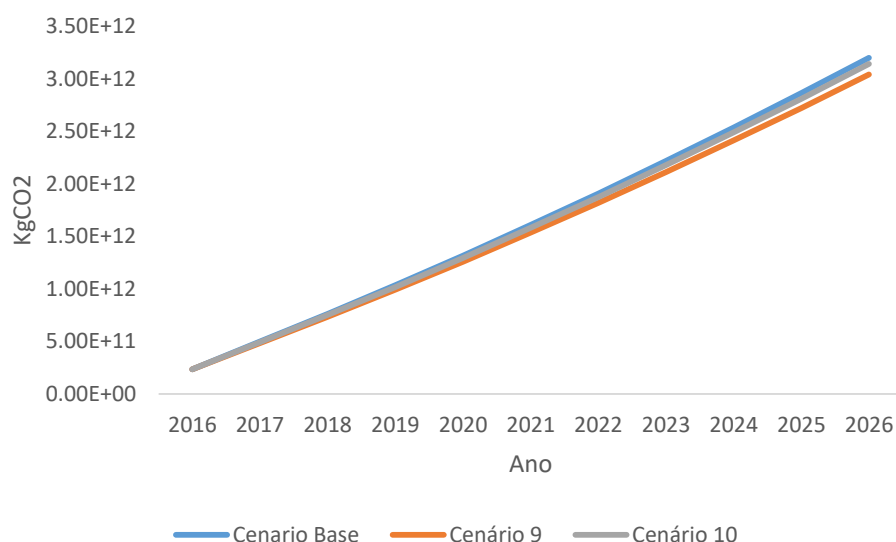


Gráfico 22 – Comportamento emissão de CO₂ nos Cenários base, 9 e 10.
 Fonte: Elaborada pela autora.

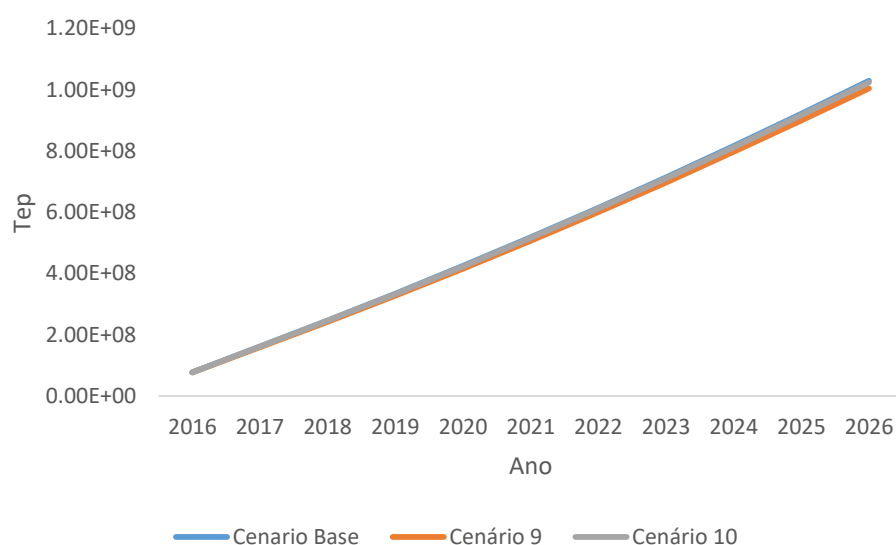


Gráfico 23 – Comportamento consumo energético nos Cenários base, 9 e 10.
 Fonte: Elaborada pela autora.

Dessa forma, há perdas na intensidade energética, já que são necessários mais recursos energéticos para se agregar valor ao PIB brasileiro.

A redução da intensidade energética do setor de transporte exige que o governo promova e invista em transporte público, desenvolva tecnologias limpas, além de estabelecer padrões de emissões e ocupações de veículos semelhantes aos

de órgãos reguladores, ou incentivar o estacionamento de carros para reduzir os congestionamentos.

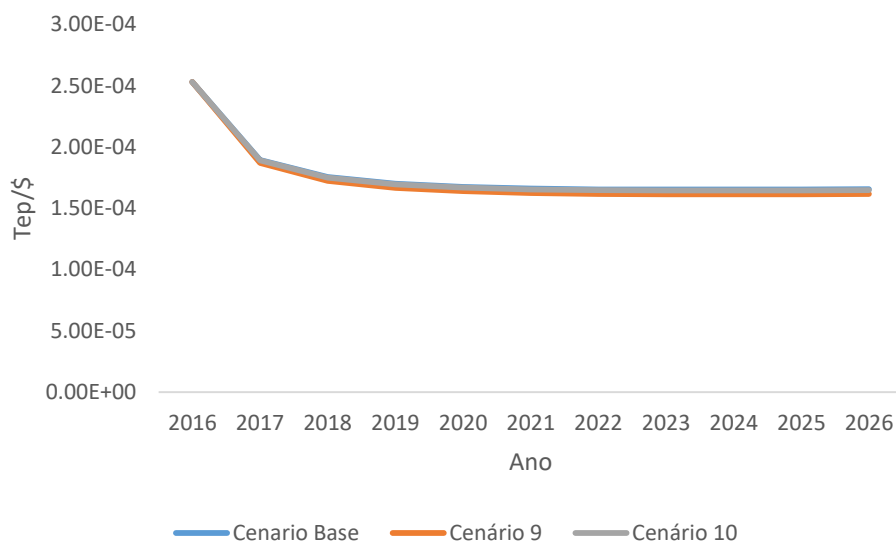


Gráfico 24 – Comportamento intensidade energética Cenários base, 9 e 10
Fonte: Elaborado pela autora.

11.6 SUBGRUPO 6: VALOR ADICIONADO PELO TRANSPORTE

No sexto subgrupo, foram simuladas alterações do valor adicionado pelo transporte no PIB. De acordo com o modelo, essas alterações impactarão a intensidade energética do setor. O comportamento do impacto dos diferentes cenários estabelecidos pode ser observado na Gráfico 25.

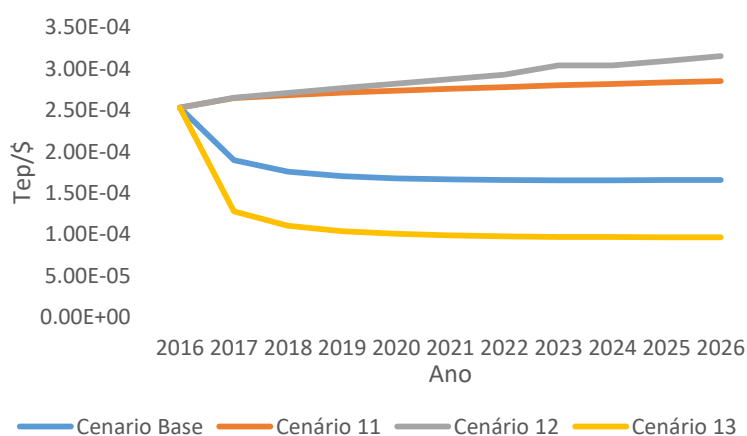


Gráfico 25 – Comportamento Intensidade Energética nos Cenários base, 11, 12 e 13.
Fonte: Elaborado pela autora.

No Cenário 13, o qual possui um viés otimista, há uma redução significativa da intensidade energética frente aos outros cenários. Isso significa dizer, que caso o Brasil mantenha para os próximos 10 anos o percentual médio de participação do setor de transporte em torno de 15%, há um ganho significativo em eficiência energética, dado que o setor passa a agregar mais valor com menores patamares de utilização de energia, o que conseqüentemente, impacta na redução nas emissões de CO₂.

11.7 COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS

A Tabela 4 demonstra os valores de saída (representadas na Figura 11) da simulação para o ano de 2026 nos diferentes cenários propostos.

Tabela 4 – Comparação cenários ano de 2026

Cenários	Vias Pav. (Km)	Varição (Cenário Base)	Emissão de CO2 (kgCO2) x 10 ⁶	Varição (Cenário Base)	Consumo Energético (tep) x 10 ³	Varição (Cenário Base)	Intensidade Energética (tep/\$) x 10 ⁻⁴	Varição (Cenário Base)
Base	169.757		3.202.930		1.029.380		1,6570	
1	168.127	-1%	3.202.930	0%	1.029.380	0%	1,7750	7%
2	170.771	1%	3.202.930	0%	1.029.380	0%	1,5880	-4%
PIB pessimista	168.207	-1%	3.202.930	0%	1.029.380	0%	1,7750	7%
3	152.523	-10%	3.202.930	0%	1.029.380	0%	1,6570	0%
4	267.421	58%	3.202.930	0%	1.029.380	0%	1,6570	0%
5	68.829	-59%	3.202.930	0%	1.029.380	0%	1,6570	0%
6	245.862	45%	3.202.930	0%	1.029.380	0%	1,6570	0%
7	169.757	0%	2.898.710	-9%	931.806	-9%	1,4990	-10%
8	169.757	0%	3.497.810	9%	1.123.970	9%	1,8090	9%
9	169.757	0%	3.043.290	-5%	1.004.730	-2%	1,6170	-2%
10	169.757	0%	3.143.280	-2%	1.024.690	-0,5%	1,6495	0%
11	169.757	0%	3.202.930	0%	1.029.380	0%	2,8510	72%
12	169.757	0%	3.202.930	0%	1.029.380	0%	3,1520	90%
13	169.757	0%	3.202.930	0%	1.029.380	0%	0,9630	-42%
14	169.757	0%	3.194.910	-0,25%	1.029.350	-0,003%	1,65695	-0,003%
15	169.757	0%	3.298.580	2,9%	1.060.060	2,9%	1,7064	2,9%

Fonte: Elaborado pela autora.

Com relação à infraestrutura, nota-se alterações nos Cenários 1, 2, 3, 4, 5 e 6. Essas alterações significam que de acordo com o modelo proposto alterações no PIB, investimentos em infraestrutura e investimentos em pavimentação de rodovias interferem diretamente na infraestrutura rodoviária.

No Cenário 4 ocorreu o maior valor do estoque de infraestrutura. Pode-se dizer então, que o maior nível de investimento em infraestrutura tem maior impacto na quantidade de quilômetros pavimentados, mesmo se comparado com o cenário otimista dos investimentos em pavimentação (Cenário 6). Assim, conclui-se que é preferível aumentar os investimentos em infraestrutura rodoviária, desde que se mantenha a média de pavimentação de rodovias, ao invés de aumentar somente o investimento destinado à pavimentação. Porém, sabe-se que manter esses patamares de investimentos não é simples.

Com relação à emissão de CO₂, o maior nível de emissão observado foi no Cenário 8. Isso significa, que dentre os fatores que afetam diretamente os níveis de emissão de dióxido de carbono, o aumento da frota é o que tem maior impacto. No Cenário 10, em que os maiores patamares de utilização de combustíveis foram simulados, ainda é possível reduzir 2% os níveis de emissão se comparado ao Cenário Base. Entretanto, a redução da frota tem um impacto mais significativo nas emissões de CO₂. Dessa forma, políticas que visam a redução na taxa de aumento da frota circulante, como maiores investimentos para aumentar a atratividade do transporte coletivo seriam desejáveis, principalmente se forem acompanhadas de políticas que promovam uma maior diversificação da matriz de transporte no Brasil.

Medidas de incentivo a mudanças nos modais de transporte desempenham um papel expressivo na redução do consumo de energia, e das emissões de gases do efeito estufa associadas ao setor. Elas incluem além da ampliação das redes de transporte público e incentivos fiscais à utilização do transporte público, a utilização de modais de transporte não motorizados, pedágios diferenciados, incentivo às caminhadas e ao ciclismo e planejamento da mobilidade urbana (ANP, 2014).

A política governamental de comercialização de combustíveis pode contribuir para redução da quantidade de veículos circulantes no Brasil. Quanto mais caro o diesel em relação ao preço da gasolina maior utilização de transporte individual motorizado e menor uso do transporte público. Estes preços exercem pouca influência na decisão de compra de um veículo privado, mas geram influência no nível de utilização destes veículos no dia a dia e, conseqüentemente, o nível de emissão de poluentes total.

Almeida, Oliveira e Losekann (2015) explicam que desde o monopólio da Petrobras na comercialização de derivados de petróleo no Brasil, o governo vem imprimindo aumentos reais para o diesel, muito superiores aos aumentos da gasolina. Nos últimos 10 anos o preço do diesel subiu 72% acima da inflação, enquanto a gasolina apenas 14%. Dessa forma, o transporte público torna-se menos atrativo e acessível em relação ao transporte individual.

Políticas de incentivos a motorização no país também contribuem para aumento das emissões. O Brasil apresenta uma taxa de motorização (quantidade de veículos para cada 100 habitantes) muito inferior à dos países desenvolvidos e também aos em desenvolvimento. Nos Estados Unidos, a taxa de motorização é de 83 veículos para cada 100 habitantes, na Argentina, 21 e no Brasil, 14 (ANFAVEA, 2012). Isso indica que há um grande potencial de crescimento nessa taxa de motorização do Brasil. A política de redução de IPI para veículos aplicada em 2008 e 2012 triplicou o aumento da capacidade instalada da indústria automobilística no Brasil (LUKIC, 2015). Esse fenômeno ocorre com mais força nos países em desenvolvimento, já que ainda possuem baixa taxa de motorização em relação aos países desenvolvidos. Nos períodos de recuperação econômica, a indústria automobilística é uma das primeiras a sentir os efeitos positivos, transformando demanda reprimida em demanda manifesta (CARVALHO, 2011; WILBERT et al, 2014), por isso ações governamentais nesse sentido, devem ser avaliadas com cautela no ponto de vista de emissão de CO₂.

O consumo energético segue o mesmo padrão observado na emissão de CO₂, visto que um está relacionado diretamente ao outro. No Cenário 14, apesar de pouco expressiva, houve uma redução nos níveis de emissões, o que indica que ações regulatórias que alteram a composição de combustíveis e incentivos para substituição por outros com menor potencial poluente, podem auxiliar no processo de mitigação das emissões.

A introdução do gás natural veicular na matriz energética do transporte, por exemplo, pode ser benéfica no processo de redução de poluentes. De acordo com Carvalho (2011) estima-se que um veículo movido a gás natural emita cerca de 20% menos de CO₂ na atmosfera. Contudo, o consumo de GNV no Brasil ainda é muito pequeno, representando menos de 1% do consumo total de álcool e gasolina. Isso ocorre em função de poucas cidades no Brasil disporem de oferta deste combustível. Este problema tende a se reduzir de importância quando houver autossuficiência na produção do gás natural no Brasil (CARVALHO, 2011).

Outra medida sancionada por meio da medida provisória nº 847 de 06 de julho de 2018 e que pode contribuir para mitigar as emissões de CO₂ é programa do Governo Federal denominado de Rota 30. O programa prevê redução do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) para veículos que superarem metas de segurança e eficiência energética. Inicialmente, haverá queda de 25% a até 7% para carros híbridos e elétricos. Para os demais carros, poderá haver redução na alíquota de 1 a 2 pontos percentuais a partir de 2023, se eles alcançarem superarem as metas estabelecidas no programa. Essa medida tem como objetivo estimular novas tecnologias na produção de veículos no Brasil (BRASIL, 2018).

No Cenário 15 buscou-se avaliar a inserção gradual desse tipo de veículos na frota brasileira. Conforme observado na Tabela 5, com os percentuais simulados nesse cenário, o impacto em termos de emissão de CO₂ ainda é maior quando comparado aos demais cenários. Isso demonstra que apenas a inserção desses veículos não é suficiente para reduzir o consumo energético do modo. Dessa

forma, medidas que visem a otimização da eficiência energética devem ser tomadas em conjunto com as de incentivo à venda de veículos híbridos.

Para popularização dos veículos elétricos e híbridos no Brasil, algumas barreiras devem ser enfrentadas. A importância que a cadeia produtiva de petróleo e gás possui no PIB brasileiro restringe o interesse por uma economia menos dependente do petróleo. Da mesma forma, a relevância econômica do setor sucroalcooleiro também é uma resistência a ser enfrentada. Em 2015, com a produção de 30,5 bilhões de litros de etanol (anidro e hidratado), o setor faturou aproximadamente R\$ 46 bilhões (CONAB, 2015).

Outro ponto refere-se a infraestrutura adequada para atender essa nova demanda, tanto no fornecimento de energia quanto na oferta de pontos de recarga de veículos elétricos, o que exigiria investimentos adicionais para difusão dessa nova tecnologia. Além disso, o pouco conhecimento dos consumidores a respeito de veículos híbridos e elétricos e a baixa disponibilidade de plantas industriais disponíveis para produção desses veículos, também devem ser considerados, uma vez que diante desse cenário, seriam necessários grandes volumes de investimentos em pesquisa e desenvolvimento ou aquisição de tecnologias disponíveis no exterior (RISSO, 2016).

Outro fator que pode auxiliar no processo de redução de recursos energéticos pelo modo rodoviário é o investimento em infraestrutura rodoviária. Estudo realizado por pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) mostram que uma rodovia em estado ruim de conservação acarreta em um aumento de 58% no consumo de combustíveis (CNT, 2001). Nesse contexto, as concessões de rodovias é uma saída para a realização de investimentos no modo rodoviário, principalmente no atual cenário brasileiro de recessão da economia, o qual reduz a capacidade do governo de financiar obras de grande porte.

Com relação à variável intensidade energética, a qual relaciona as variáveis de custo econômico com as variáveis de consumo energético, observou-se maior variação dentre os cenários avaliados. O menor valor para essa variável foi observado no Cenário 13, em que o Valor Adicionado pelo Transporte atingiu

seu maior patamar. Esse dado mostra que há um ganho significativo em aumentar a produtividade do setor em comparação à redução de emissões ocasionadas pela diminuição da frota de veículos (Cenário 7).

Tornar o uso de energia mais eficiente no setor de transporte, é um problema que vem sendo discutido na União Europeia. Assim, levou à adoção de diversas medidas: substituição de modais transportes, redução do consumo específico de veículos leves e pesados, encorajamento da aquisição de veículos mais limpos, incentivo a mudanças nos hábitos dos motoristas, entre outros. A redução da demanda pelos serviços de transportes também já é considerada pelos formuladores de políticas europeus, um ponto-chave para a redução do consumo (ANP, 2014).

O Brasil, a exemplo da União Europeia, precisa investir em políticas com objetivo de encorajar a aquisição de veículos mais eficientes do ponto de vista do consumo de energia, à exemplo do que foi proposto no programa Rota 30. Esses incentivos podem ser feitos por meio de promoção de impostos diferenciados em função da eficiência no consumo e das emissões de CO₂, por exemplo, o que pode também ajudar no processo de renovação de frota de carros muito antigos, que possuem consumo de energia elevado.

O encorajamento dos motoristas no sentido de dirigir de maneira mais eficiente também pode acarretar em economia de combustíveis. De modo semelhante, o transporte solidário quando amplamente incentivado com o objetivo de promover mudanças nos hábitos de motoristas e passageiros pode trazer benefícios para aplacar o consumo energético do setor (IPEA,2016).

O Brasil, a exemplo de países europeus, vem tentando criar e implantar medidas para buscar um desenvolvimento sustentável no setor de transporte, principalmente no modo rodoviário, devido a dependência que o país possui do mesmo. Porém, essas medidas ainda caminham a passos lentos, principalmente por divergências nos interesses políticos e econômicos que são atualmente os principais entraves para o desenvolvimento do país. Assim sendo, o Estado precisa assumir efetivamente seu papel regulador nos aspectos relacionado à

utilização de energia pelo modo rodoviário. Intensificar a fiscalização e sanções a empresas, estados e municípios que não atenderem ou se adequarem a legislação e programas vigentes, assim como efetivar os incentivos para aqueles que cumprirem seu papel mediante as iniciativas de otimização do uso energético do setor, pode ser um início para o atingimento das metas de eficiência energética e emissão de CO₂ almejadas.

12 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente há um esforço conjunto em termos mundiais para que as nações consigam alcançar um desenvolvimento sustentável, em que haja ganhos econômicos a partir de menores índices de utilização energética de fontes emissoras de CO₂. Destarte, um método qualitativo, combinado à abordagem de dinâmica de sistemas, pode ser uma importante ferramenta para formulações e planejamentos voltados à busca de um desenvolvimento sustentável.

Por meio da discussão teórica realizada foi possível entender como as variáveis crescimento econômico, investimento em infraestrutura, emissão de CO₂, frota de veículos e consumo energético para o modo rodoviário se relacionam no Brasil de maneira sistêmica e temporal. Após buscas na literatura disponível, pode-se perceber a existência de uma lacuna sobre estudos que abordem essas relações, principalmente no caso do Brasil.

No entanto, existem estudos que relacionam algumas dessas variáveis para outros países. Contudo, grande parte desses estudos foram elaborados utilizando ferramentas estatísticas, como observado em Pao e Tsai (2010), Pao e Tsai (2011) Achour e Belloumi (2016) e Hossain (2011), Fodha e Zaghdoud (2010), Menyah e Wolde-Rufael (2010), Halicioglu (2009), Wang et al (2011). As metodologias estatísticas empregadas nos estudos citados trazem algumas limitações, uma vez que a representação das relações entre as variáveis são expostas de forma simplificada, ou seja, não são mostradas todas as variáveis que interferem no sistema. Somado a isso, nos estudos citados, a dinâmica das relações ao longo do tempo não pode ser verificada, por ser tratar de ferramentas estatísticas.

Dentro os estudos encontrados na literatura que utilizam a DS em transportes o estudo de Diaz, Behr e Ng (2016) foi o único que se aproximou do tema do presente trabalho. Contudo, foi avaliado somente o comportamento das relações cíclicas entre investimento em infraestrutura, crescimento econômico e congestionamento para o estado da Virgínia (EUA), entretanto o estudo não tem

um viés ambiental, uma vez que não foram exploradas as questões relativas ao consumo energético e emissão de CO₂.

Este estudo forneceu uma pesquisa inicial, propondo de forma global, uma relação entre crescimento econômico, investimento em infraestrutura, emissão de CO₂, frota de veículos e consumo energético no Brasil para o modo rodoviário sob o prisma da Dinâmica de Sistemas. Por meio do diagrama de causa e efeito elaborado, foi exposta a relação entre as variáveis estudadas. A partir desta perspectiva teórica, um diagrama de estoque e fluxo foi elaborado relacionando todas as variáveis que possibilitam a avaliação integrada dos fatores estudados por meio de equações diferenciais.

Nesse contexto, acredita-se que esse trabalho contribui para a literatura de modo a complementar o conhecimento difundido. Além disso, o presente estudo corrobora para o planejamento estratégico e tomada de decisão no que se refere à formulação e implementação de políticas que visam um desenvolvimento sustentável para as atividades relativas ao modo rodoviário no Brasil por meio de um modelo de simulação dinâmica, auxiliando no entendimento do comportamento do sistema, na variação da frota de veículos, no uso de combustíveis e, principalmente, no impacto desses fatores no desempenho econômico do país.

Dessa forma, o objetivo do trabalho foi alcançado, visto que o modelo de simulação proposto auxilia a compreensão do comportamento do sistema real, demonstrando como o crescimento econômico, a extensão das vias pavimentadas e a frota de veículos impactam nas emissões de CO₂ e o consumo energético do setor de transporte no Brasil.

Além disso, o trabalho fornece uma avaliação para os próximos 10 anos de como o aumento na frota e investimentos em infraestrutura rodoviária podem contribuir com a redução de uso de recursos energéticos no modo rodoviário e conseqüentemente, reduzir as emissões de CO₂, ocasionando assim um aumento na eficiência energética do setor.

Os resultados das simulações mostraram que algumas ações interferem em maior ou menor grau no índice de emissão de CO₂. Essas ações devem ser consideradas ao tomar decisões no que tange a redução de emissões e à busca por crescimento econômico. Pode-se perceber que devido a dependência existente pelo modo rodoviário, o desafio fica ainda maior para o Brasil. Contudo, é possível alcançar maiores patamares de crescimento econômico junto com um crescimento moderado nas emissões de CO₂. Para isso, faz-se necessário o planejamento da utilização de combustíveis, uma maior diversificação da utilização dos diferentes modais disponíveis no país e um melhor investimento em infraestrutura rodoviária.

O modelo de dinâmica de sistemas criado pode ser implementado em outros países e os resultados podem ser comparados com o trabalho atual. Para maior aprofundamento do estudo, em termos econômicos, sugere-se buscar inserção de variáveis que relacionem o PIB com a frota de veículos, para que seja possível uma avaliação direta dessas duas variáveis. Além disso, os custos de manutenção de rodovias e seu impacto na extensão rodoviária do Brasil, não foi considerado nesse trabalho. Da mesma forma, o impacto do transporte de cargas na degradação do pavimento, pode ser considerada, dado a dimensão que o mesmo possui no Brasil.

Do ponto de vista da diversificação de combustíveis, pode-se simular cenários em que há maior utilização de GNV em vista do uso da gasolina e do álcool e do biodiesel em substituição ao diesel com o objetivo de avaliar a efetividade na redução de emissão de CO₂ que políticas de incentivos a esses combustíveis teriam ao longo do tempo.

Ainda assim, a presente dissertação fornece um modelo base para análise de fatores que interferem no desempenho econômico e ambiental do setor de transporte no Brasil e contribui por reduzir parte da lacuna encontrada na literatura.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, K. A.; BELL, M. G.. System dynamics applicability to transportation modeling. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 28, n. 5, p. 373-390, 1994.
- ACHOUR, H.; BELLOUMI, M. Investigating the causal relationship between transport infrastructure, transport energy consumption and economic growth in Tunisia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 56, p. 988-998, 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO - ANP. **Eficiência Energética do Setor de Transporte da União Europeia**. Rio de Janeiro: ANP, 2014. Disponível em: < <https://www.anp.gov.br/SITE/acao/download/?id=69992> >. Acesso em: ago. 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO - ANP. **Modelo de Projeção de Uso de Energia Baseado em Coeficientes Setoriais de Intensidade Energética: Princípios e Metodologia**. Rio de Janeiro: ANP, 2001. Disponível em: < http://www.anp.gov.br/doc/notas_tecnicas/Nota_Tecnica_ANP_012_2001.pdf >. Acesso em: jun 2018.
- AKISHINO, P. Semáforo. In:_____. **Estudos de Tráfego**. Curitiba, 2005, p. 190.
- ALMEIDA, E. L. F.; OLIVEIRA, P. V.; LOSEKANN, L. Impactos da contenção dos preços de combustíveis no Brasil e opções de mecanismos de precificação. **Revista de Economia Política**, [s.l.], v. 35, n. 3, p.531-556, set. 2015.
- AMANN, E., W. BAER, T. TREBAT, J. M. Villa. 2014. **Infrastructure and Its Role in Brazil's Development Process**. IRIBA Working Paper 10, School of Environment, Education and Development, University of Manchester.
- ANFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira (Brazilian Automotive Industry Yearbook) 2012**. São Paulo: ANFAVEA, 2012.
- ANG, J. B. CO2 emissions, energy consumption, and output in France. **Energy Policy**, [s.l.], v. 35, n. 10, p.4772-4778, out. 2007.
- ANG, J. B. Economic development, pollutant emissions and energy consumption in Malaysia. **Journal Of Policy Modeling**, [s.l.], v. 30, n. 2, p.271-278, mar. 2008.
- ASLANI, A., HELO, P.; NAARANOJA, M. Role of renewable energy policies in energy dependency in Finland: System dynamics approach. **Applied Energy**, nº 113, p. 758-765, 2014.
- AZLINA, A. A., LAW, S. H.; MUSTAPHA, N. H. N. Dynamic linkages among transport energy consumption, income and CO2 emission in Malaysia. **Energy Policy**, p. 73, 598-606, 2014.
- BANISTER, D. BERECHMAN, Y. Transport investment and the promotion of economic growth. **Journal of Transport Geography**, Pergamon, v. 9, n. 3, p. 209-218, 2001.

BARTHOLOMEU, D. B.; CAIXETA FILHO, J. V. Impactos econômicos e ambientais decorrentes do estado de conservação das rodovias brasileiras: um estudo de caso. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, [s.l.], v. 46, n. 3, p.703-738, set. 2008.

BOCK, A. L. pesagem em movimento de cargas atuantes em rodovias e seu impacto no desempenho de pavimentos da rede temática de asfalto. 2016. 273 f. **Tese** (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética; BRASIL. **Balanco Energético Nacional 2000 a 2017**. Rio de Janeiro: EPE.

BRASIL. **Medida Provisória nº 843, de 06 de julho de 2018**. Estabelece requisitos obrigatórios para a comercialização de veículos no Brasil, institui o Programa Rota 2030 - Mobilidade e Logística e dispõe sobre o regime tributário de autopeças não produzidas. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 14 de julho de 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários** – Relatório Final, Brasília, 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013 Ano Base 2012** – Relatório Final, Brasília, 2014.

BRASIL. Ministério do Transporte. **Plano Setorial de Transporte e de Mobilidade Urbana para Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima (PSTM)**. Brasília, 2013.

CAMPOS NETO, C. A. S. Investimentos na Infraestrutura de Transporte: avaliação do período 2002-2013 e perspectivas para 2014-2016. **Texto para Discursão**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td_2014.pdf>. Acesso em: abr. 2018.

CARVALHO, C. H. R. Emissões Relativas de Poluentes do Transporte Motorizado de Passageiros nos Grandes Centros Urbanos Brasileiros. **Texto para Discursão**. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://www.en.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td_1606.pdf>. Acesso em ago. 2018.

CARVALHO, M. Simulando por meio da dinâmica de sistemas a influência dos tribunais de contas estaduais na qualidade da gestão pública e na atração de investimentos privados. *Cad. EBAPE.BR* [online]. 2008, vol.6, n.1, p.01-16.

CHANDRAN, V. G. R.; TANG, C. F. The impacts of transport energy consumption, foreign direct investment and income on CO 2 emissions in ASEAN-5 economies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 24, 445-453, 2013.

CHONTANAWAT, J.; HUNT, L.C.; PIERSE, R. Does energy consumption cause economic growth? Evidence from a systematic study of over 100 countries. **Journal of Poly Modeling**. N. 39, p. 209-220, 2008.

COONDOO, D.; DINDA, S. Causality between income and emission: a country group-specific econometric analysis. **Ecological Economics**, [s.l.], v. 40, n. 3, p.351-367, mar. 2002.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB – **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>>. Acesso em: set. 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT – **Atlas do Transporte**. Brasília, 2006. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Paginas/atlas-do-transporte>>. Acesso: maio 2018

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT – **Estudo: Transporte Rodoviário – Desempenho do Setor, Infraestrutura e Investimentos**. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relatorio-gerencial>>. Acesso: maio 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT – **Transporte Rodoviário: desempenho do setor, infraestrutura e investimentos**. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Estudo/transporte-rodoviario-desempenho>>. Acesso: maio 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT - Relatório Gerencial: **Pesquisa CNT de rodovias**. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relatorio-gerencial>>. Acesso: maio 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES – CNT . **Revista CNT**. Brasília, 2001. Vários números. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br>>. Acesso em: ago. 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES – CNT . **Revista CNT**. Brasília, 2001. Vários números. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br>>. Acesso em: ago. 2018.

DE OLIVEIRA, G. C. A economia brasileira em marcha lenta. **O Brasil pós-recessão: das origens da crise às perspectivas e desafios futuros**, p. 160, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Custo Construção de Rodovia**. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO (DENATRAN). **Frota de veículos**, 2000 a 2018.

DIAZ, R.; BEHR, J. G.; Ng, M. Quantifying the economic and demographic impact of transportation infrastructure investments: A simulation study. **Simulation**, 92(4), 377-393, 2016.

DOE, U. S. EIA. **Manufacturing Energy Consumption Survey (MECS)-2006 Data, EIA, Washington, DC, 2006.**

Dorantes, L.M., Paez, A., & Vassallo, J. M. Transportation infrastructure impacts on firm location: the effect of a new metro line in the suburbs of Madrid. **Journal of Transport Geography**, 22, 236-250, 2012.

ELLER, R. A. G.; SOUZA JUNIOR, W. C.; CURI, M. L. C. Custos do transporte de carga no Brasil: rodoviário versus ferroviário. **Revista de Literatura dos Transportes**, v. 5, n. 1, p. 50-64, 2011

ELY, R. A.; LEAL, R. A.; UHR, J. G. Z.; UHR, D. A. P. Ciclos Econômicos e Emissão de CO2 no Brasil: Uma Análise Dinâmica para Políticas Ambientais Ótimas. **Revista Brasileira de Economia**, [s.l.], v. 69, n. 1, p.53-73, 2015.

FERNANDES, A. D. C. **Scorecard Dinâmico** - Em Direção à Integração da Dinâmica de Sistemas com o Balanced Scorecard. Rio de Janeiro: UFRJ, 2003. Tese de Doutorado.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Balanco Energético Nacional 2001:** Ano Base 2000. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **Balanco Energético Nacional 2002:** Ano Base 2001. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **Balanco Energético Nacional 2003:** Ano Base 2002. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **Balanco Energético Nacional 2004:** Ano Base 2003. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **Balanco Energético Nacional 2005:** Ano Base 2004. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **Balanco Energético Nacional 2006:** Ano Base 2005. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **Balanco Energético Nacional 2007:** Ano Base 2006. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **Balanco Energético Nacional 2008:** Ano Base 2007. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **Balanco Energético Nacional 2009:** Ano Base 2008. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **Balanco Energético Nacional 2010:** Ano Base 2009. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **Balanco Energético Nacional 2011:** Ano Base 2010. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **Balanco Energético Nacional 2012:** Ano Base 2011. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **Balanco Energético Nacional 2013:** Ano Base 2012. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **Balço Energético Nacional 2014**: Ano Base 2013. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **Balço Energético Nacional 2015**: Ano Base 2014. Rio de Janeiro, 2015.

_____. Caracterização do Cenário Macroeconômico: para os próximos 10 anos (2016–2026). **Nota Técnica DEA**, v. 6, p. 13, 2016.

FERREIRA, P. C.; MALLIAGROS, T. G. Impactos produtivos da infraestrutura no Brasil — 1950/95. **Pesquisa e Planejamento Econômico**. v. 28, nº 2, Rio de Janeiro, 1998.

FODHA, M.; ZAGHDOUD, O. Economic growth and pollutant emissions in Tunisia: An empirical analysis of the environmental Kuznets curve. **Energy Policy**, [s.l.], v. 38, n. 2, p.1150-1156, fev. 2010. Elsevier BV.

FORRESTER, J. W. **Industrial Dynamics**. Cambridge, U.K.: Productivity Press, 1961.

_____. “The” model versus a modeling “process” - Forrester. **System Dynamics Review**, 1985. v. 1, p. 133–134.

FRISCHTAK, C. R.; MOURÃO, J.; O Estoque de Capital de Infraestrutura no Brasil: uma abordagem setorial. **Desafio da Nação**. p. 133, 2017.

GHALI, K. H.; EL-SAKKA, M. I. T. Energy use and output growth in Canada: a multivariate cointegration analysis. **Energy Economics**, v. 26, n. 2, p.225-238, mar 2004.

GEORGIADIS, P.; VLACHOS, D. The effect of environmental parameters on product recovery. **European Journal of Operational Research**, v.157, n. 2, p. 449-464, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte) -

GHISOLFI, V. **Dinâmica de Sistemas para Avaliação de Impactos do Excesso de Peso no Transporte Rodoviário de Cargas**. COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.

GHOSH, S. Examining carbon emissions economic growth nexus for India: A multivariate cointegration approach. **Energy Policy**, [s.l.], v. 38, n. 6, p.3008-3014, jun. 2010.

GWILLIAM, K. **Concession and Franchise Contract Design in Transport**. mimeo, The World Bank Institute, 1998.

HALICIOGLU, Ferda. An econometric study of CO2 emissions, energy consumption, income and foreign trade in Turkey. **Energy Policy**, [s.l.], v. 37, n. 3, p.1156-1164, mar. 2009. Elsevier BV

HATZIGEORGIU, E.; POLATIDIS, H.; HARALAMBOPOULOS, D. CO₂ emissions, GDP and energy intensity: a multivariate cointegration and causality analysis for Greece, 1977–2007. **Applied Energy**, nº 88, p. 1377-1385, 2011.

HOSSAIN, M. S. Panel estimation for CO₂ emissions, energy consumption, economic growth, trade openness and urbanization of newly industrialized countries. **Energy Policy**, v. 39, n. 11, p. 6991-6999, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Contas Nacionais**: PIB em valores correntes. 2000 a 2016.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. **Logística e Transporte no Brasil**: uma análise do programa de investimentos 2013-2017 em rodovias e ferrovias. Brasília: Ipea, 2016.

Internacional Energy Agency - IEA. **Energy and Climate Change**, 2015. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015SpecialReportonEnergyandClimateChangeExecutiveSummaryPortugueseversion.pdf>>. Acesso em abr. 2018.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. EPHRAUMS, J. J.; JENKINS, G. J. J. **Climate change 1992**. Cambridge University Press, 1992.

JIFENG, W., HUAPU, L., HU, P. System dynamics model of urban transportation system and its application. **Journal of Transportation Systems engineering and information technology**, 8(3), 83-89, 2008.

LACERDA, D. P.; SILVA, E. R. P.; NAVARRO, L. L. L.; OLIVEIRA, N. N. P.; CAULLIRAUX, H. M. Algumas caracterizações dos métodos científicos em Engenharia de Produção: uma análise de periódicos nacionais e internacionais. *In*: XXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2007, Foz do Iguaçu. **Anais eletrônicos...** Foz do Iguaçu: Abepro, 2007. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/profile/Daniel_Lacerda/publication/267967689_ALGUMAS_CHARACTERIZACOES_DOS_METODOS_CIENTIFICOS_EM_ENGENHARIA_DE_PRODUCAO_UMA_ANALISE_DE_PERIODICOS_NACIONAIS_E_INTERNACIONAIS/links/54df31020cf2510fcee63cc6/ALGUMAS-CARACTERIZACOES-DOS-METODOS-CIENTIFICOS-EM-ENGENHARIA-DE-PRODUCAO-UMA-ANALISE-DE-PERIODICOS-NACIONAIS-E-INTERNACIONAIS.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2018.

LEAN, H. H.; SMYTH, R.. CO₂ emissions, electricity consumption and output in ASEAN. **Applied Energy**, [s.l.], v. 87, n. 6, p.1858-1864, jun. 2010.

LUKIC, M. S. R. Extrafiscalidade e Regulação da Economia: as mudanças tributárias nos Governos Lula e Dilma. **Fundação Getúlio Vargas**. Rio de Janeiro. v.36, n.71, p.197. out/dez – 2015.

JEBLI, M. B.; HADHRI, W. The dynamic causal links between CO₂ emissions from transport, real GDP, energy use and international tourism. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, 25:6, 568-577, 2018.

MENYAH, K.; WOLDE-RUFANEL, Y. Energy consumption, pollutant emissions and economic growth in South Africa. **Energy Economics**, [s.l.], v. 32, n. 6, p.1374-1382, 2010. Elsevier BV

METZ, B. **Climate change 2007: mitigation: contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.

MORECROFT, J. D. **Strategic Modelling and Business Dynamics: a feedback systems approach**. 2 ed. Nova Deli: Wiley, 2015.

MORESI, E. (Org.). **Metodologia da pesquisa**. Brasília: Universidade Católica de Brasília (UCB), 2003.

MOSQUET, X.; ZABLIT, H.; DINGER, A.; XU, G.; ANDERSEN, M.; TOMINAGA, K. **The Electric Car Tipping Point: the future of powertrains for owned and shared mobility**. The Boston Consulting Group. 2018.

MULA, J.; CAMPUZANO-BOLARIN, F.; DÍAZ-MADROÑERO, M.; CARPIO, K. M. A system dynamics model for the supply chain procurement transport problem: comparing spreadsheets, fuzzy programming and simulation approaches, **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 13, p. 4087-4104, 2013.

NAIM, M. M.; TOWILL, D. R. Establishing a Framework for Effective Materials Logistics Management. **The International Journal of Logistics Management**, v. 5, n. 1, p. 81-88, 1994.

NARAYAN, P. K.; SMITH, R. Energy consumption and real GDP in G7 countries: new evidences from panel cointegration with structural breaks. **Energy Economics**, n. 30, p. 2331 – 2341, 2008.

NASH, Chris; RUS MENDOZA, Ginés de. **Desarrollos recientes en economía del transporte**. Editorial Civitas, 1998.

NIU, S., DING, Y.A, NIU, Y.A, LI, Y.A, LUO, G.A. Economic growth, energy conservation and emissions reduction: A comparative analysis based on panel data for 8 Asian-Pacific countries. **Energy Policy**, [s.l.], v. 39, n. 4, p.2121-2131, abr. 2011. Elsevier BV.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA - OC. **Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG)**. Observatório do Clima [online], 2017. Disponível em < http://www.observatoriodoclima.eco.br/wp-content/uploads/2017/10/seeg2017presskit_FINAL.pdf>. Acesso em: abr. 2018.

ONG, H.C.; MAHLIA, T.M.I.; MASJUKI, H.H.. A review on energy pattern and policy for transportation sector in Malaysia. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 16, n. 1, p.532-542, jan. 2012. Elsevier BV.

OZTURK, I.; ACARAVCI, A. The long-run and causal analysis os energy, growth, openness and financial development on carbono emissions in Turkey. **Energy Economics**, nº 36, 2013, p. 262-267.

PAO, H.; TSAI, C.. CO2 emissions, energy consumption and economic growth in BRIC countries. **Energy policy**, v. 38, n. 12, p. 7850-7860, 2010.

PAO, H.; TSAI, C.. Multivariate Granger causality between CO2 emissions, energy consumption, FDI (foreign direct investment) and GDP (gross domestic product): Evidence from a panel of BRIC (Brazil, Russian Federation, India, and China) countries. **Energy**, [s.l.], v. 36, n. 1, p.685-693, jan. 2011.

QUDRAT-ULLAH, H.; SEONG, B. S. How to do structural validity of a system dynamics type simulation model: The case of an energy policy model. **Energy Policy**, [s.l.], v. 38, n. 5, p.2216-2224, maio 2010. Elsevier BV.

PMSP – PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO. **Relatório Técnico de Quantificação de Emissões de GEE pelo Setor de Energia São Paulo – SP** PMSP/SVMA Nov/2012

RAISER, M; CLARKE, R.; PROCEE, P.; BRICENO-GARMENDIA, C. **De volta ao planejamento: como preencher a lacuna de infraestrutura no Brasil em tempos de austeridade**. Brasília: Banco Mundial, 2017. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/pt/237341502458978189/pdf/117392-PORTUGUESE-PortBacktoPlanningFinal.pdf> 28 . Acesso em: jul. 2018

RICHARDSON, G. **Feedback thought in social science and systems theory**. Philadelphia: University of Pennsylvania Press, 1996.

RISSO, M. L. Veículos elétricos, redução dos gases de efeito estufa: o projeto Emotive da CPFL energia. In: MARCOVITCH, J. (Org.). **Os Compromissos de Paris e os ODS 2030: energia, florestas e redução de GEE**. São Paulo: FEA/USP, 2016. Disponível em:<<https://www.usp.br/mudarfuturo/cms/>>. Acesso em: set. 2018.

SABOORI, B.; SAPRI, M.; BABA, M. B. Economic growth, energy consumption and CO₂ emissions in OECD (Organization for Economic Co-operation and Development)'s transport sector: A fully modified bi-directional relationship approach. **Energy**, v. 66, p^o 150-161, 2014.

SARI, R.; SOYTAS, U. Are global warming and economic growth compatible? Evidence from five OPEC countries? **Applied Energy**, [s.l.], v. 86, n. 10, p.1887-1893, out. 2009.

SAYSEL, A. K., HEKIMOĞLU, M. Exploring the Options for Carbon Dioxide Mitigation in Turkish Electric Power Industry: System Dynamics Approach. **Energy Policy**. v. 60, p 675-686, 2013.

SENGE, P. **A quinta Disciplina: a arte e prática da organização que aprende**. 22 ed. Rio de Janeiro: Best Seller, 2006.

SHEPHERD, S. P. A review of system dynamics models applied in transportation. **Transportmetrica B: Transport Dynamics**, v. 2, n. 2, p. 83-105, 2014.

SILVA, E. L. D.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4^a ed. Florianópolis: UFSC, 2005. V. 123.

SNIESKA, V., & SIMKUNAITE, I. Socio-economic impact of infrastructure investments. **Engineering Economics**, 63(4), 2009.

STERMAN, J. D. **Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world**. 2000.

STERN, D. I. Energy and economic growth in the USA: a multivariate approach. **Energy Economics**. v. 15, 1993.

SURYANI, E.; CHOU, S.; HARTONO, R.; CHEN, C. Demand scenario analysis and planned capacity expansion: a system dynamics framework. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 18, n. 6, p. 732-751, 2010.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD – TRB. **Highway Capacity Manual 2010**. National Research Council., Washington D.C., EUA, 2010.

VERSHININA, A. A.; OLGA A. Z., TATIANA P. M., DENIS G. P. The formation of indicator framework for effective assessment of investment attractiveness of the region. **International Journal of Economics and Financial Issues**, v. 5, n. 3S, p. 136-141, 2015.

ZAGONEL, A. A.; CORBET, T. F. **Levels of Confidence in System Dynamics Modeling: A Pragmatic Approach to Assessment of Dynamic Models**. In: International Conference of the System Dynamics Society, 24., 2006. Nijmegen, The Netherlands. Proceedings... Nijmegen: ISDC, 2006. p. 1-19.

WANG, SS.; ZHOU, D.; ZHOU, P.; WANG, QW. **CO₂ emissions, energy consumption and economic growth in China: a panel data analysis** Energy Policy, nº 39. 2011, p. 4870-4875

WILBERT, M. D.; SERRANO, A. L. M.; GONÇALVES, R. S.; ALVES, L. S. Redução do imposto sobre produtos industrializados e seu efeito sobre a venda de automóveis no Brasil: uma análise do período de 2006 a 2013. **Revista Contemporânea de Contabilidade**. São Paulo, v. 11 n. 24, p.107-124, set/dez - 2014.

APÊNDICE A – TABELA DE EQUAÇÕES E VARIÁVEIS DO MODELO

Tabela 5 – Equacionamento das variáveis do modelo (continua)

Tipo	Variável	Equação	Unidade
Esto que	Km rodado da frota	$\int_{t_0}^t (viajar)dt + kmrod_0$	ucp.km/ano
	Fluxo médio anual	$\int_{t_0}^t \left(\frac{kmrod}{inf}\right) dt + flxmed_0$	ucp/ano
	Infraestrutura	$\int_{t_0}^t (const - desg)dt + inf_0$	Km
	Investimento em infraestrutura	$\int_{t_0}^t (investir)dt + invinf_0$	\$
	PIB	$\int_{t_0}^t (PIB + \text{variação anual do PIB})dt + PIB_0$	\$
	Valor adicionado pelo transporte	$\int_{t_0}^t (vvat)dt + vat_0$	\$
	CO ₂ emitido pelo modo	$CO2\ emitido$ $= \int_{t_0}^t (Taxa\ de\ emissão\ de\ CO2\ (\text{Álcool Etílico An} + Taxa\ de\ emissão\ de\ CO2\ (\text{Álcool Etílico Hidrat} + Taxa\ de\ emissão\ de\ CO2\ (\text{Biodiesel} + Taxa\ de\ emissão\ de\ CO2\ (\text{Gasolina Automotiva} + Taxa\ de\ emissão\ de\ CO2\ (\text{Gás Natural} + Taxa\ de\ Emissão\ de\ CO2\ (\text{Diesel})))dt + co2emitmod_0$	kgCO ₂
	Consumo Energético do Modo	$\int_{t_0}^t (Taxa\ de\ consumo\ de\ energia\ (\text{Álcool Etílico A} + Taxa\ de\ consumo\ de\ energia\ (\text{Álcool Etílico Hi} + Taxa\ de\ consumo\ de\ energia\ (\text{Biodiesel} + Taxa\ de\ consumo\ de\ energia\ (\text{Gasolina} + Taxa\ de\ consumo\ de\ energia\ (\text{Gás Natuaral} + Taxa\ de\ consumo\ de\ energia\ (\text{Diesel})))dt + consenerg_0$	Tep/ano
Fluxo	Viajar	$FT * MAKMROD$	ucp.km/ano
	Desgastar		
	Construir	$Construir = INVINFROD/PC$	Km/ano
	Investir	$\%PIBINV * PIB$	\$/ano
	Variação Anual do PIB	$PIBANUAL$	\$/ano
	Variação do valor	$PIB * VAT\%$	\$/ano

adicionado pelo transporte			
Taxa de emissão de CO ₂ (gás natural)	$FC_{Gás\ Natural} * QNT_{Gás\ Natural}$		kgCO ₂ /ano
Taxa de emissão de CO ₂ (biodiesel)	$FC_{Biodiesel} * QNT_{Biodiesel}$		kgCO ₂ /ano
Taxa de emissão de CO ₂ (diesel)	$FC_{Diesel} * QNT_{Diesel}$		kgCO ₂ /ano
Taxa de emissão de CO ₂ (gasolina)	$FC_{Gasolina} * QNT_{Gasolina}$		kgCO ₂ /ano
Taxa de emissão de CO ₂ (álcool etílico anidro)	$FC_{Álcool\ anidro} * QNT_{Álcool\ anidro}$		kgCO ₂ /ano
Taxa de emissão de CO ₂ (álcool etílico hidratado)	$FC_{Álcool\ hidratado} * QNT_{Álcool\ hidratado}$		kgCO ₂ /ano
Taxa de Consumo de energia (gás natural)	$QNT_{Gás\ Natural} * (10^{-3}) * Densidade_{Gás\ Natural}$		tep/ano
Taxa de Consumo de energia (biodiesel)	$QNT_{Biodiesel} * (10^{-3}) * Densidade_{Biodiesel}$		tep/ano
Taxa de Consumo de energia (diesel)	$QNT_{Diesel} * (10^{-3}) * Densidade_{Diesel}$		tep/ano
Taxa de Consumo de energia (gasolina)	$QNT_{Gasolina} * (10^{-3}) * Densidade_{Gasolina}$		tep/ano
Taxa de Consumo de energia (álcool etílico hidratado)	$QNT_{Álcool\ Hidratado} * (10^{-3}) * Densidade_{Álcool\ Hidratado}$		tep/ano
Taxa de Consumo de energia (álcool etílico anidro)	$QNT_{Álcool\ Anidro} * (10^{-3}) * Densidade_{Álcool\ Anidro}$		tep/ano
Auxiliar	Fator de equivalência	$FECO$	ucp/ano

de caminhão e ônibus		
Fator de equivalência de motos	<i>FEM</i>	ucp/ano
Fator de equivalência de veículos articulados	<i>FEVA</i>	Ucp/ano
Quantidade de caminhões e ônibus	<i>Qntco</i>	adimensional
Quantidades de motos	<i>Qntm</i>	adimensional
Quantidades de veículos articulados	<i>Qnva</i>	adimensional
Quantidade de carros	<i>Qntc</i>	adimensional
Frota total	$Qntco * FECO + Qntm * FEM + Qnva * FEVA + Qntc$	
Média Anual de km rodados	<i>MKMROD</i>	Km/ano
Fator de Impacto na Infraestrutura	<i>FIINF</i>	adimensional
Limite de fluxo de rodovias	<i>LFROD</i>	ucp/ano
Fator de degradação	<i>FD</i>	adimensional
preço de construção	<i>PC</i>	\$/km
% anual do PIB em investimento	<i>%PIBINV</i>	adimensional
PIB anual	<i>PIBANUAL</i>	\$/ano
Valor agregado do transporte	<i>VAT%</i>	%/ano
Intensidade Energética	<i>IntEner</i>	tep/\$
Intensidade de emissão de CO2	<i>IntEm</i>	kgCO2/tep
Impacto do PIB nas emissões de CO2	<i>ImpEmCO2</i>	\$
% de veículos que utilizam GNV	<i>%VGNV</i>	%/ano

Km rodados por veículos que utilizam GNV	$KmRodGNV = \%VGNV * kmrod$	Km/ano
Quantidade de Gás Natural consumida	$QNTGásNatural = KmRodGNV * ConsGNV$	l/ano
Consumo médio de GNV	$ConsGNV$	l/km
Fator de conversão Gás Natural	$FCGásNatural$	kgCO2/l
% de veículos que utilizam Biodiesel	$\%VBiodiesel$	%/ano
Km rodados por veículos que utilizam Biodiesel	$KmRodBiodiesel = \%Biodiesel * kmrod$	Km/ano
Quantidade de Biodiesel consumida	$QNTBiodiesel = KmRodBiodiesel * ConsBiodiesel$	l/ano
Consumo médio de Biodiesel	$ConsBiodiesel$	l/km
Fator de conversão Biodiesel	$FCBiodiesel$	kgCO2/l
% de veículos que utilizam Diesel	$\%VDiesel$	%/ano
Km rodados por veículos que utilizam Diesel	$KmRodDiesel = \%Diesel * kmrod$	Km/ano
Quantidade de Diesel consumida	$QNTDiesel = KmRodDiesel * ConsDiesel$	l/ano
Consumo médio de Diesel	$ConsDiesel$	l/km
Fator de conversão Diesel	$FCDiesel$	kgCO2/l
% de veículos que utilizam Gasolina	$\%VGasolina$	%/ano
Km rodados por veículos	$KmRodGasolina = \%Gasolina * kmrod$	Km/ano

que utilizam Gasolina		
Quantidade de Gasolina consumida	$QNT_{Gasolina} = Km_{RodGasolina} * Cons_{Gasolina}$	l/ano
Consumo médio de Gasolina	$Cons_{Gasolina}$	l/km
Fator de conversão Gasolina	$FC_{Gasolina}$	kgCO ₂ /l
% de veículos que utilizam Álcool Anidro	$\%V_{ÁlcoolAnidro}$	%/ano
Km rodados por veículos que utilizam Álcool Anidro	$Km_{RodÁlcoolAnidro} = \%ÁlcoolAnidro * km_{rod}$	Km/ano
Quantidade de Álcool Anidro consumida	$QNT_{ÁlcoolAnidro} = Km_{RodÁlcoolAnidro} * Cons_{ÁlcoolAnidro}$	l/ano
Consumo médio de Álcool Anidro	$Cons_{ÁlcoolAnidro}$	l/km
Fator de conversão Álcool Anidro	$FC_{ÁlcoolAnidro}$	kgCO ₂ /l
% de veículos que utilizam Álcool Hidratado	$\%V_{ÁlcoolHidratado}$	%/ano
Km rodados por veículos que utilizam Álcool Hidratado	$Km_{RodÁlcoolHidratado} = \%ÁlcoolHidratado * km_{rod}$	Km/ano
Quantidade de Álcool Hidratado consumida	$QNT_{ÁlcoolHidratado} = Km_{RodÁlcoolHidratado} * Cons_{ÁlcoolHidratado}$	l/ano
Consumo médio de Álcool Hidratado	$Cons_{ÁlcoolHidratado}$	l/km
Fator de conversão Álcool Hidratado	$FC_{ÁlcoolHidratado}$	kgCO ₂ /l
Densidade Gás Natural	$Densidade_{GásNatural}$	tep/m ³
Densidade Biodiesel	$Densidade_{Biodiesel}$	tep/m ³

Densidade Diesel	<i>Densidade Diesel</i>	tep/m ³
Densidade Gasolina	<i>Densidade Gasolina</i>	tep/m ³
Densidade Álcool Anidro	<i>Densidade Álcool Anidro</i>	tep/m ³
Densidade Álcool Hidratado	<i>Densidade Álcool Hidratado</i>	tep/m ³

APÊNDICE B – PARÂMETROS DO MODELO

Quadro 6 – Valores PIB Brasil 2000 a 2016

Ano	PIB valores correntes em 1.000.000
2000	1.199.092
2001	1.315.755
2002	1.488.787
2003	1.717.950
2004	1.957.751
2005	2.170.585
2006	2.409.450
2007	2.720.263
2008	3.109.803
2009	3.333.039
2010	3.885.847
2011	4.376.382
2012	4.814.760
2013	5.331.619
2014	5.778.953
2015	6.000.570
2016	6.266.895

Fonte: IBGE (2000 a 2016)

Quadro 7 – Frota circulante brasileira 2000 a 2016

Frota Circulante										
ANO	Automóveis	Varição Anual Automóveis	Comerciais Leves	Var. Anual Com. Leves	Caminhões	Var. Anual Caminhões	Ônibus	Var. Anual Ônibus	Motos	Var. Anual Motos
2000	15.531.100	-	2.461.564	-	1.141.593	-	195.043		2.483.000	
2001	16.207.108	676.008	2.545.542	83.978	1.147.509	5.916	202.514	7.471	2.971.000	488.000
2002	16.880.806	673.698	2.603.833	58.291	1.147.220	-289	209.805	7.291	3.523.000	552.000
2003	17.464.861	584.055	2.613.992	10.159	1.149.698	2.478	216.097	6.292	4.137.000	614.000
2004	18.140.137	675.276	2.649.970	35.978	1.170.933	21.235	223.620	7.523	4.864.000	727.000
2005	18.925.914	785.777	2.692.045	42.075	1.192.603	21.670	228.034	4.414	5.511.000	647.000
2006	19.892.111	966.197	2.743.974	51.929	1.212.530	19.927	235.768	7.734	6.284.000	773.000
2007	21.296.756	1.404.645	2.843.076	99.102	1.256.384	43.854	246.366	10.598	7.329.000	1.045.000
2008	22.917.140	1.620.384	3.007.421	164.345	1.325.137	68.753	260.296	13.930	8.556.000	1.227.000
2009	24.814.743	1.897.603	3.200.707	193.286	1.382.489	57.352	269.369	9.073	9.452.000	896.000
2010	26.887.692	2.072.949	3.498.639	297.932	1.440.289	57.800	283.774	14.405	10.605.000	1.153.000
2011	28.945.933	2.058.241	3.850.832	352.193	1.608.988	168.699	303.804	20.030	11.659.041	1.054.041
2012	31.122.622	2.176.689	4.193.857	343.025	1.696.818	87.830	317.395	13.591	12.403.574	744.533
2013	33.091.826	1.969.204	4.544.052	350.195	1.800.210	103.392	334.984	17.589	13.055.818	652.244
2014	34.676.232	1.584.406	4.878.936	334.884	1.885.487	85.277	346.679	11.695	13.468.113	412.295
2015	35.471.476	795.244	5.019.732	140.796	1.905.157	19.670	346.959	280	13.638.643	170.530
2016	35.757.773	286.297	5.090.814	71.082	1.902.564	-2.593	341.068	-5.891	13.469.778	-168.865

Fonte: DENATRAN (2000-2016).

Quadro 8 – Porcentagem de utilização anual por tipo de combustível

Ano	Gás natural	Diesel	Biodiesel	Gasolina	Álcool anidro	Álcool hidratado
2000	0.005577235	0.490208656	0	0.305571889	0.101655352	0.096986868
2001	0.010197169	0.505793846	0	0.301012586	0.107105929	0.07589047
2002	0.016812835	0.507284418	0	0.277000041	0.124387532	0.074515173
2003	0.0229052	0.49327246	0	0.293766094	0.125167951	0.064888294
2004	0.025457182	0.492838154	0	0.283750906	0.120051559	0.077902199
2005	0.030709477	0.480515595	1.13671E-05	0.278826755	0.120613235	0.089323571
2006	0.035898775	0.479837389	0.001052435	0.291862367	0.080931491	0.110417543
2007	0.036339098	0.458931594	0.005623804	0.263476214	0.088426844	0.147202445
2008	0.031608941	0.439716424	0.011056779	0.243334018	0.085263757	0.18902008
2009	0.026789928	0.425187879	0.015286463	0.242413833	0.080803836	0.20951806
2010	0.023204823	0.423788252	0.021089379	0.263066989	0.082030339	0.186820219
2011	0.021796418	0.428284626	0.022541296	0.299115854	0.093235748	0.135026058
2012	0.020231174	0.427803124	0.022515954	0.330881192	0.080843898	0.117724658
2013	0.01826538	0.427144739	0.022481302	0.309098867	0.094508081	0.128501632
2014	0.016942197	0.412616157	0.024801586	0.311936953	0.10302543	0.130677677
2015	0.016560668	0.391476302	0.029465958	0.283477377	0.102677973	0.176341721
2016	0.017330777	0.396646061	0.02985508	0.300626663	0.106261769	0.149279651

Fonte: EPE (2001-2017).

APÊNDICE C – CENÁRIOS PROPOSTOS

Tabela 6 – Cenários Propostos para Variação do PIB, Investimento em Infraestrutura Rodoviária e Investimentos em Pavimentação de Rodovia

Subgrupo	PIB			Inv. em Infraestrutura Rodoviária		Inv. Pavimentação Rodovias	
	Cenário Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
% Variação Anual do PIB	0.02	0	0.032	0.020	0.020	0.020	0.020
% anual do PIB em investimentos	0.0013	0.0013	0.0013	0.001	0.003	0.001	0.001
% investimentos utilizados para pavimentação de rodovias	0.1645	0.1645	0.1645	0.165	0.165	0.010	0.281
Variação da frota carros (unidades)	1,264,167	1,264,167	1,264,167	1,264,167	1,264,167	1,264,167	1,264,167
Variação da frota motos (unidades)	686,674	686,674	686,674	686,674	686,674	686,674	686,674
Variação da frota caminhões (unidades)	164,328	164,328	164,328	164,328	164,328	164,328	164,328
Variação da frota com. leves (unidades)	47,560	47,560	47,560	47,560	47,560	47,560	47,560
Variação da frota ônibus (unidades)	9,126	9,126	9,126	9,126	9,126	9,126	9,126
% de veículos que utilizam GNV	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022
% de veículos que utilizam Biodiesel	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
% de veículos que utilizam Diesel	0.452	0.452	0.452	0.452	0.452	0.452	0.452
% de veículos que utilizam Gasolina	0.287	0.287	0.287	0.287	0.287	0.287	0.287
% de veículos que utilizam Álcool Anidro	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
% de veículos que utilizam Álcool Hidratado	0.127	0.127	0.127	0.127	0.127	0.127	0.127
% Participação PIB Transporte	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 7 - Cenários Propostos para Frota, % de veículos por tipo de combustível, valor adicionado do transporte e política B10

Subgrupo	Frota de Veículos		% de veículos por tipo de combustível		PIB Transporte			Política B10
	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9	Cenário 10	Cenário 11	Cenário 12	Cenário 13	Cenário 14
Variação Anual do PIB	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
% anual do PIB em investimentos	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
% investimentos utilizados para pavimentação de rodovias	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165
Variação da frota carros	286,297	2,176,689	1,264,167	1,264,167	1,264,167	1,264,167	1,264,167	1,264,167
Variação da frota motos	-168,865	686,674	686,674	686,674	686,674	686,674	686,674	686,674
Variação da frota caminhões	10,159	352,193	164,328	164,328	164,328	164,328	164,328	164,328
Variação da frota com. leves	-2,593	168,699	47,560	47,560	47,560	47,560	47,560	47,560
Variação da frota ônibus	-5,891	20,030	9,126	9,126	9,126	9,126	9,126	9,126
% de veículos que utilizam GNV	0.022	0.022	0,007	0,036	0.022	0.022	0.022	0.022
% de veículos que utilizam Biodiesel	0.012	0.012	0,000	0,030	0.012	0.012	0.012	0.014
% de veículos que utilizam Diesel	0.452	0.452	0,499	0,507	0.452	0.452	0.452	0.450
% de veículos que utilizam Gasolina	0.287	0.287	0,308	0,331	0.287	0.287	0.287	0.287
% de veículos que utilizam Álcool Anidro	0.100	0.100	0,103	0,120	0.100	0.100	0.100	0.100
% de veículos que utilizam Álcool Hidratado	0.127	0.127	0,083	0,210	0.127	0.127	0.127	0.127
% Participação PIB Transporte	0.088	0.088	0.088	0.088	0.049	Redução de 0,15% ao ano	0.154	0.049

Fonte: Elaborado pela autora.