



UMA ESTRUTURA PARA AVALIAR OS IMPACTOS DINÂMICOS DA POLÍTICA
NACIONAL DE MOBILIDADE URBANA EM SISTEMAS SOCIOECONÔMICOS
DE TRANSPORTE

Wlisses Bonelá Fontoura

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

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2019

UMA ESTRUTURA PARA AVALIAR OS IMPACTOS DINÂMICOS DA POLÍTICA
NACIONAL DE MOBILIDADE URBANA EM SISTEMAS SOCIOECONÔMICOS
DE TRANSPORTE

Wlisses Bonelá Fontoura

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

Examinada por:

Prof. Glaydston Mattos Ribeiro, D.Sc.

Prof. Licínio da Silva Portugal, D.Sc.

Prof. Gisele de Lorena Diniz Chaves, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2019

Fontoura, Wlisses Bonelá

Uma estrutura para avaliar os impactos dinâmicos da Política Nacional de Mobilidade Urbana em sistemas socioeconômicos de transporte / Wlisses Bonelá Fontoura. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XV, 122 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

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

Referências Bibliográficas: p. 97-113.

1. Planejamento de transportes. 2. Política Nacional de Mobilidade Urbana. 3. Dinâmica de Sistemas. I. Ribeiro, Glaydston Mattos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

*Aos meus sobrinhos, Valentina e Caetano, que, mesmo à
distância, trouxeram leveza para os meus dias durante esta
ádua caminhada.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pelo dom da vida, por me proteger, guiar e conceder força necessária à realização de mais uma conquista.

Aos meus pais, Claudentina e Benedito, pelo apoio e amor incondicional. Obrigado por sempre acreditarem nos meus sonhos e nunca medirem esforços para que eu pudesse realizá-los.

À minha irmã Letícia por ser o meu orgulho e o meu grande exemplo. A sua parceria, confiança e incentivo foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui.

Aos meus sobrinhos, Valentina e Caetano, que transformam os meus dias e me enchem de amor com apenas um sorriso.

À Maria, Victor e Ricardo por terem feito a minha estadia no Rio de Janeiro mais suave e alegre. Obrigado por todos os momentos vividos e experiências compartilhadas.

Ao meu orientador Glaydston Mattos Ribeiro não só pelos ensinamentos e pela valiosa orientação, mas também pela preocupação com o meu bem estar durante esta caminhada. Obrigado pelo comprometimento e incentivo à pesquisa.

A todos os professores que fizeram parte da minha formação acadêmica, desde a educação infantil até a pós-graduação.

À minha turma, PET 2017/1, em especial à Isabella da Hora que esteve comigo antes mesmo do primeiro dia de aula.

Aos demais colegas do Programa de Engenharia de Transportes, especialmente à Thayse Ferrari pela amizade e parceria que estende há quase uma década.

À Jane Correa e Helena Santos por toda atenção, paciência e carinho ao meu auxiliar diversas vezes nesses últimos anos.

Aos professores Licínio da Silva Portugal e Gisele de Lorena Diniz Chaves por aceitarem participar da banca, pelo tempo dispendido na avaliação e por toda contribuição para aprimoramento da pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo auxílio concedido.

Enfim, agradeço a todos que acreditaram e, de alguma forma, contribuíram para a conclusão de mais uma etapa na minha vida.

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

UMA ESTRUTURA PARA AVALIAR OS IMPACTOS DINÂMICOS DA POLÍTICA NACIONAL DE MOBILIDADE URBANA EM SISTEMAS SOCIOECONÔMICOS DE TRANSPORTE

Wlisses Bonelá Fontoura

Fevereiro/2019

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

Programa: Engenharia de Transportes

O planejamento de transportes é necessário para que se atenda a demanda de uma determinada região considerando as dimensões do espaço urbano e a complexidade das atividades nele desenvolvidas. Além do planejamento, destaca-se a importância da intervenção dos governos por meio de políticas para proporcionar um fluxo adequado de pessoas e de bens de modo que atenda a demanda da população. Neste contexto, a Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU) objetiva a integração entre os diferentes modos de transporte e a melhoria da acessibilidade e da mobilidade no espaço urbano. Sendo assim, este trabalho apresenta um modelo de apoio a decisão, utilizando o método da Dinâmica de Sistemas como ferramenta de modelagem e simulação, para avaliar os impactos da implementação da PNMU, com foco nas variáveis ambientais, econômicas e de tráfego. Com o intuito de verificar a aplicabilidade do modelo proposto, foi realizado um estudo de caso na cidade do Rio de Janeiro. Os resultados apontam a importância do incentivo a viagens não motorizadas e, também, a redução do número de viagens realizadas por veículos individuais. Além disso, observa-se a necessidade de aplicar as estratégias da Gestão da Mobilidade para reduzir as externalidades negativas do transporte e, conseqüentemente, aumentar a eficiência do sistema de transporte urbano.

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

A FRAMEWORK FOR EVALUATING THE DYNAMIC IMPACTS OF THE
BRAZILIAN URBAN MOBILITY POLICY FOR TRANSPORTATION
SOCIECONOMIC SYSTEMS

Wlisses Bonelá Fontoura

February/2019

Advisor: Glaydston Mattos Ribeiro

Department: Transportation Engineering

Transportation planning is necessary to meet the demand of a given region considering the dimensions of urban space and the complexity of the activities developed on it. In addition to planning, the government intervention through policies to provide an adequate flow of people and goods to meet population demand is also important. In Brazil, the Brazilian Urban Mobility Policy (BUMP) aims to integrate different modes of transportation and improve accessibility and mobility in urban space. Thus, this study presents a decision support model, using System Dynamics as a modeling and simulation tool, to evaluate the impacts of BUMP implementation, focusing on environmental, economic and traffic variables. In order to verify the applicability of the proposed model, a case study was carried out in the city of Rio de Janeiro. The results indicate the importance of encouraging non-motorized trips and the reduction of the number of trips performed by individual vehicles. Besides that, there is a need to apply the Transportation Demand Management strategies to reduce negative transport externalities and, consequently, to increase the efficiency of the urban transport system.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos Geral e Específicos.....	2
1.2	Justificativa.....	3
1.3	Procedimento Metodológico.....	6
1.4	Estrutura do Trabalho	8
2	POLÍTICA NACIONAL DE MOBILIDADE URBANA	9
2.1	Mobilidade Urbana.....	9
2.2	A Evolução das Políticas de Mobilidade Urbana no Brasil	13
2.3	Decreto-Lei N° 12.587/2012.....	14
2.4	Desafios para a implementação da PNMU	18
2.5	Considerações Finais	20
3	DINÂMICA DE SISTEMAS.....	22
3.1	Diagrama de Causa e Efeito.....	24
3.2	Diagrama de Estoque e Fluxo	27
3.3	Testes dos Modelos em Dinâmica de Sistemas	29
3.4	Aplicação da Dinâmica de Sistemas na Análise da Mobilidade Urbana ..	33
3.5	Considerações Finais	37
4	MODELO PROPOSTO UTILIZANDO DINÂMICA DE SISTEMAS.....	38
4.1	Submodelo População.....	46
4.2	Submodelo Economia	46
4.3	Submodelo Demanda de Transporte.....	48
4.4	Submodelo Oferta de Transporte.....	50
4.5	Submodelo Transporte Público	53
4.6	Submodelo Congestionamento.....	54
4.7	Submodelo Meio Ambiente	56
4.8	Unidades de Medida	58
4.9	Considerações Finais	61
5	ESTUDO DE CASO.....	62
5.1	Descrição da Área de Estudo	62
5.1.1	O Sistema de Transporte Urbano da Cidade do Rio de Janeiro	63
5.1.1.1	Ônibus.....	64
5.1.1.2	Metrô	65

5.1.1.3 VLT	66
5.1.1.4 Trem	66
5.1.2 Desafios da Mobilidade Urbana no Rio de Janeiro	67
5.2 Parâmetros do Estudo de Caso	69
5.2.1 Submodelo População	69
5.2.2 Submodelo Economia.....	70
5.2.3 Submodelo Demanda de Transporte.....	71
5.2.4 Submodelo Oferta de Transporte.....	73
5.2.5 Submodelo Transporte Público	75
5.2.6 Submodelo Congestionamento	75
5.2.7 Submodelo Meio Ambiente.....	76
5.3 Considerações Finais	77
6 CENÁRIOS E RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DINÂMICA	78
6.1 Teste do Modelo Proposto	78
6.2 Definição dos Cenários de Simulação	79
6.3 Análise dos Resultados do Cenário Base	80
6.4 Análise dos Resultados do Cenário 1	85
6.5 Análise dos Resultados do Cenário 2	88
6.6 Análise dos Resultados do Cenário 3	89
6.7 Análise dos Resultados do Cenário 4	90
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
APÊNDICE A – PROJEÇÃO POPULACIONAL PELO MÉTODO AIBI	114
APÊNDICE B – OBTENÇÃO DAS CURVAS S-SHAPED	115
APÊNDICE C – TESTE DE ERRO DE INTEGRAÇÃO	118
APÊNDICE D – TESTE DE CONDIÇÃO EXTREMA	119
ANEXO A – REDE DE TRANSPORTE DO RIO DE JANEIRO.....	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Círculo vicioso da falta de planejamento urbano.....	3
Figura 1.2 – Procedimento metodológico proposto	7
Figura 2.1 – Situação dos Planos Diretores em municípios com mais de 20.000 habitantes	18
Figura 3.1 – Processo de Modelagem	23
Figura 3.2 – Representação gráfica dos <i>loops</i> de reforço e equilíbrio	25
Figura 3.3 – DCE para a população de uma espécie	25
Figura 3.4 – DCE para o sistema viário	26
Figura 3.5 – Componentes do DEF	27
Figura 3.6 – DEF para a população	29
Figura 4.1 – Diagrama de Causa e Efeito proposto.....	38
Figura 4.2 – Diagrama de Estoque e Fluxo proposto	45
Figura 4.3 – Submodelo População.....	46
Figura 4.4 – Submodelo Economia	46
Figura 4.5 – Submodelo Demanda de Transporte	48
Figura 4.6 – Submodelo Oferta de Transporte	50
Figura 4.7 – Submodelo Transporte Público.....	54
Figura 4.8 – Submodelo Congestionamento	55
Figura 4.9 – Submodelo Meio Ambiente	56
Figura 5.1 – Localização Geográfica do Rio de Janeiro	62
Figura 5.2 – Característica dos deslocamentos no Rio de Janeiro	64
Figura 5.3 – Projeção da taxa de crescimento da População do Rio de Janeiro.....	69
Figura 5.4 – Atratividade do Modo não Motorizado.....	72
Figura 5.5 – Atratividade do Transporte Público	73
Figura 6.1 – Número de viagens com Modo não Motorizado (a) e com Modo Motorizado (b)	81
Figura 6.2 – Número de viagens com Transporte Público	82
Figura 6.3 – Número de viagens com Transporte Individual.....	82
Figura 6.4 – Nível de Congestionamento	83
Figura 6.5 – Emissão total de CO ₂ (a) e acréscimo anual de CO ₂ (b).....	84
Figura 6.6 – RTR (a) e Área coberta (b) do Rio de Janeiro	85
Figura 6.7 – Submodelo Demanda de Transporte sem implementação da PNMU.....	86

Figura 6.8 – Nível de congestionamento sem implementação da PNMU.....	87
Figura 6.9 – Emissão anual de CO ₂ sem implementação da PNMU.....	88
Figura 6.10 – Nível de congestionamento para diferentes ocupações médias de veículos	89
Figura 6.11 – Quilometragem total de vias urbanas (a), trilhos de metrô (b), trem (c) e VLT (d).....	91
Figura 6.12 – RTR (a) e Área coberta (b) do Rio de Janeiro	92
Figura 6.13 – RTR para diferentes níveis de investimento	93
Figura 6.14 – Área Coberta para diferentes níveis de investimento.....	93
Figura D.1 – Tamanho da população (a) e número total de viagens (b)	119
Figura D.2 – Nível de congestionamento (a) e RTR (b)	120
Figura D.3 – Nível de congestionamento para uma média de 5 pessoas por veículo individual.....	120
Figura D.4 – Nível de congestionamento (a) e acréscimo anual de CO ₂ (b).....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Estratégias da Gestão da Mobilidade (TDM).....	12
Tabela 3.1 – Categoria dos testes	31
Tabela 4.1 – Variáveis do modelo proposto	43
Tabela 4.2 – Equacionamento e unidades de medida das variáveis	59
Tabela 4.3 – Unidade de medida das variáveis encontradas em outras referências	61
Tabela 5.1 – Percentual do PIB destinado a Transportes	70
Tabela 5.2 – Taxa média de viagem no Rio de Janeiro	71
Tabela 5.3 – Quilometragem total de trilhos por modo na cidade do Rio de Janeiro ...	74
Tabela 5.4 – Custo médio por quilômetro de trilho por modo	75
Tabela 5.5 – Área Territorial e taxa de crescimento.....	75
Tabela 5.6 – Taxa de utilização de cada modo nos deslocamentos.....	75
Tabela 5.7 – Emissão de CO ₂ por modo de transporte.....	76
Tabela 6.1 – Descrição dos cenários propostos	80
Tabela C.1 – Nível de Congestionamento para diferentes valores de <i>Time Step</i>	118

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Testes para avaliação de modelos dinâmicos	32
Quadro 5.1 – Taxa de Crescimento do PIB da cidade do Rio de Janeiro	70
Quadro 6.1 – Níveis de congestionamento para diferentes <i>delays</i> no aumento do investimento em transporte.....	90
Quadro 6.2 – Quilometragem total de vias e de trilhos em Km para diferentes níveis de investimentos em infraestrutura	92

LISTA DE SIGLAS

ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes dos Veículos Automotores
ANTP – Associação Nacional de Transportes Públicos
BRS – *Bus Rapid Service*
BRT – *Bus Rapid Transit*
CAU/BR – Conselho de Arquitetura e Urbanismo do Brasil
CNT – Confederação Nacional do Transporte
CO – Monóxido de Carbono
CO₂ – Dióxido de Carbono
DCE – Diagrama de Causa e Efeito
DEF – Diagrama de Estoque e Fluxo
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DOTS – Desenvolvimento Orientado ao Transporte Sustentável
DS – Dinâmica de Sistemas
DTP – Distância Total Percorrida
FETRANS – Federação das Empresas de Transportes de Passageiros do Ceará, Piauí e Maranhão
FETRANSPOR – Federação das Empresas de Transportes de Passageiros do Estado do Rio de Janeiro
HC – Hidrocarbonetos
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPI – Imposto sobre Produtos Industrializados
ITDP – The Institute for Transportation and Development Policy
MP – Material Particulado
NO_x – Óxidos de Nitrogênio
NTU – Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos
OECD – The Organisation for Economic Co-operation and Development
OICA – The Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles
PDTU – Plano Diretor de Transporte Urbano
PIB – Produto Interno Bruto
PLANMOB – Plano de Mobilidade
PMUS – Plano de Mobilidade Urbana Sustentável
PNDU – Política Nacional de Desenvolvimento Urbano

PNMU – Política Nacional de Mobilidade Urbana

PNT – Percentual de Pessoas Próximas a Rede de Transporte de Média e Alta Capacidade

RMRJ – Região Metropolitana do Rio de Janeiro

RTR – *Rapid Transit to Resident*

SEMOB – Secretaria Nacional de Transporte e da Mobilidade Urbana

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SO_x – Óxidos de Enxofre

TDM – Gestão da Demanda dos Transportes

VKT – *Vehicle-Kilometers Traveled*

VLT – Veículo Leve sobre Trilhos

VTPI – Victoria Transport Institute

1 INTRODUÇÃO

O planejamento de sistemas de transportes é necessário para a definição de metas e estratégias que adequem a oferta de transporte com a demanda existente ou futura. Este planejamento busca detectar, diagnosticar e antecipar os problemas e os desafios do sistema, contribuindo para o processo de tomada de decisão (Shah *et al.*, 2013). Sendo assim, a partir desse planejamento é possível descobrir a melhor combinação dos recursos disponíveis e a forma de operação adequada para atender a demanda de uma determinada região.

Além de atender a demanda considerando as dimensões do espaço urbano e a complexidade das atividades nele desenvolvidas, o planejamento de transportes deve ponderar as necessidades específicas da população. Portanto, para que se obtenha um sistema de transporte eficiente e justo, o deslocamento de pessoas e de cargas deve ser considerado nas políticas urbanas, no planejamento dos transportes urbanos e na configuração espacial das cidades (Santos; Aguiar, 2013).

As políticas públicas devem atender a população em seus direitos constitucionais e a institucionalização de tais políticas é fundamental para amparar o processo de planejamento de transportes (Brasil, 2018). Entretanto, além da formulação e implementação das políticas públicas, é necessário desenvolver procedimentos de análise e controle para que se obtenha uma constante melhoria dessas políticas (Rodrigues Júnior; Vieira, 2017).

Nesse contexto de políticas públicas, a Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU), criada em 2012, tem como intuito estabelecer as diretrizes e amparar as cidades na melhoria da acessibilidade e mobilidade, garantindo aos usuários do sistema o direito de um deslocamento adequado, seguro e acessível. Além de considerar os princípios de inclusão social e da sustentabilidade ambiental, esta política busca integrar o planejamento urbano, transporte e trânsito (Brasil, 2012).

Entretanto, existem alguns desafios para a implementação desta política, tais como moderar a circulação de veículos particulares, repensar o *design* urbano, dar prioridade ao transporte coletivo, reduzir a necessidade de viagens motorizadas, definir a política tarifária do transporte coletivo e fornecer a mobilidade para pessoas com deficiência (Silva *et al.*, 2015). Além disso, Machado e Piccinini (2018) apontam a necessidade de sistematizar/compilar as normas, os critérios e os padrões existentes para

as ações mínimas exigidas por esta política, facilitando assim a sua própria implementação.

A mobilidade urbana é um dos maiores desafios que as cidades enfrentam atualmente e, por isso, é uma das prioridades da pauta de planejamento das cidades (Lerner, 2011). Para auxiliar os gestores na resolução dos novos desafios nesse setor, métodos e ferramentas como, por exemplo, aplicativos computacionais e Sistemas de Informação Geográfica (SIG), têm sido amplamente utilizados no processo de tomada de decisão e na comparação de abordagens de solução.

A atual formatação do sistema de transporte proporciona uma variedade de estudos (de tráfego, de políticas tarifárias, de mobilidade urbana, entre outros) que abordam este complexo sistema integrado que, atuando entre si, deve proporcionar acessibilidade a população. Tendo em vista a crise de mobilidade urbana enfrentada no Brasil (Xavier; Boareto, 2005; Motta *et al.*, 2013; Rodrigues, 2013; Marx *et al.*, 2015; Diniz; Vieira, 2016; Mello; Portugal, 2017), este trabalho visa propor uma estrutura para avaliar o impacto das mitigações propostas pela PNMU nos sistemas socioeconômicos de transporte.

1.1 Objetivos Geral e Específicos

Face às informações apresentadas, surge a seguinte problemática: a Política Nacional de Mobilidade Urbana é capaz de garantir o deslocamento dos cidadãos e de bens no perímetro urbano, assegurando a acessibilidade de movimentação e a sustentabilidade ambiental?

Diante de tal problema de pesquisa, o objetivo principal deste trabalho consiste em desenvolver um modelo, utilizando o método da Dinâmica de Sistemas como ferramenta de modelagem e simulação, para verificar a eficácia da Política Nacional de Mobilidade Urbana, com foco nas variáveis ambientais, econômicas e de tráfego.

Para tanto, este trabalho considera ainda os seguintes objetivos específicos:

1. Identificar as variáveis relacionadas a mobilidade urbana sustentável e os desafios para a implementação da PNMU nos municípios brasileiros;
2. Relacionar as variáveis identificadas em um Diagrama de Causa e efeito;
3. Elaborar e equacionar o Diagrama de Estoque e Fluxo;
4. Obter os parâmetros quantitativos necessários para a utilização de um modelo matemático;

5. Testar e simular o modelo proposto para a obtenção e análise de cenários;
e
6. Realizar um estudo de caso na cidade do Rio de Janeiro para verificar a aplicabilidade do modelo proposto.

1.2 Justificativa

A mobilidade urbana é um fator preponderante na qualidade de vida da população, pois o modelo de circulação de pessoas e de cargas no espaço urbano interfere diretamente no desenvolvimento econômico da região (Brasil, 2015b). Entretanto, o Brasil enfrenta diversos problemas de mobilidade urbana, concentrados, principalmente, nos grandes centros urbanos, onde os problemas se manifestam de maneira mais evidente (Rodrigues, 2016a).

Para Boareto (2008), tanto no Brasil quanto em outros países, o grande problema consiste na análise fragmentada dos sistemas de transportes, resultando na dissociação entre o sistema de transporte público, a circulação de veículos particulares e o uso do solo. A ausência da integração entre as políticas setoriais (habitação, mobilidade urbana e uso do solo) compromete a mobilidade no espaço urbano, gerando um ciclo vicioso (apresentado na Figura 1.1), que resulta em uma continuidade dessa desintegração (CNT; NTU, 2017).

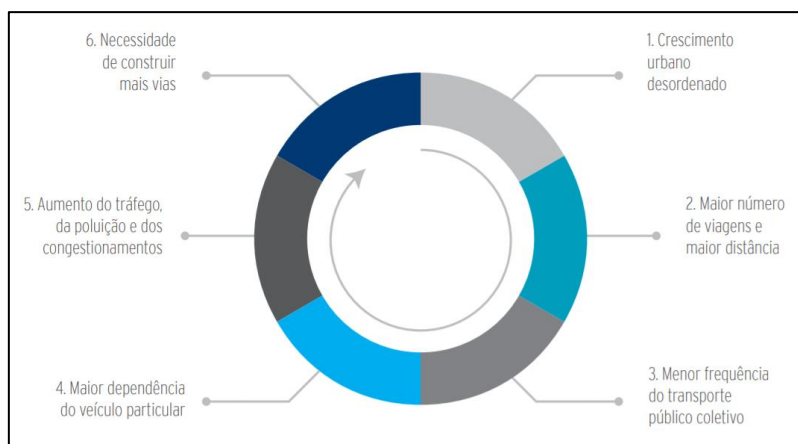


Figura 1.1 – Ciclo vicioso da falta de planejamento urbano
Fonte: CNT e NTU (2017, p. 16).

Deste modo, observa-se que o atual modelo de mobilidade urbana nas cidades brasileiras é o resultado de um crescimento urbano desordenado que favorece o uso do veículo particular, intensificando a dissipação das cidades e a fragmentação do espaço urbano devido à flexibilidade dos deslocamentos automobilísticos (Brasil, 2004b). Com

isso, aumenta-se a complexidade que envolve o atendimento das necessidades de deslocamentos da população (Portugal *et al.*, 2017).

Essa valorização do transporte individual pode ser vista por meio das estatísticas da indústria automobilística. O Brasil ocupa a 9ª posição no *ranking* dos maiores produtores de veículos do mundo (OICA, 2018). Em 2018 foram produzidos 2,88 milhões de veículos, o que representa uma expansão de 5% ante as 2,74 milhões de unidades de 2017. Quanto aos licenciamentos, em 2018 foram licenciados 2,56 milhões de unidades, resultando em um acréscimo de 14,6% quando comparado ao ano de 2017 (ANFAVEA, 2019).

Além da produção de situações crônicas de congestionamentos, o transporte individual resulta no aumento da emissão de poluentes. O transporte individual corresponde por apenas 35% das viagens e é responsável por aproximadamente 60% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) nos grandes centros brasileiros. Enquanto isso, o transporte coletivo é responsável por 25% das emissões de CO₂ no pior cenário (Carvalho, 2011).

Diante disso, nota-se que, além de proporcionar um aumento da mobilidade associado ao crescimento populacional, as políticas públicas são importantes para a resolução de problemas relativos ao desenvolvimento na perspectiva da sustentabilidade (Portugal *et al.*, 2017). Deste modo, é necessário que o poder público integre três políticas: a econômica que proporciona a concentração de renda que permite acesso ao automóvel; a social que objetiva garantir a livre circulação dos habitantes e bens no espaço urbano e a ambiental que busca atender as demandas das outras políticas de maneira sustentável.

Além da priorização do transporte individual em detrimento do transporte público, um agravante da mobilidade urbana é a infraestrutura dos sistemas de transportes. Nos últimos anos, o Brasil vem investindo em infraestrutura para suprir a demanda de transporte, mas essas melhorias ainda são insuficientes para atender as necessidades da população. Em 1980, o indicador de transporte de média e alta capacidade por residente ou RTR (da sigla em inglês para *Rapid Transit to Resident*) era de 8,8 km/milhão de residentes urbanos. Em 2014, o RTR subiu para 10,7 km/milhão de habitantes, evidenciando um crescimento ínfimo e inferior ao de países com PIB *per capita* menor que o do Brasil como, por exemplo, Colômbia e Indonésia (ITDP, 2016).

Mesmo que embrionários e com diversos problemas, cidades com mais de 60 mil habitantes começam a possuir sistemas de transportes públicos. Entretanto, os problemas

de circulação e de uso do solo são mais evidentes nas cidades com mais de 500 mil habitantes (Boareto, 2008). Além disso, esses problemas se manifestam de maneira desigual em função de um conjunto de fatores econômicos e sociais e, também, pelas características físicas do município (Brasil, 2007).

Localizada na região sudeste do Brasil e com mais de 6,5 milhões de habitantes, o Rio de Janeiro é uma das cidades mais influentes na economia do país, possuindo o segundo maior PIB nacional (IBGE, 2014). O transporte e o desenvolvimento urbano possuem um papel fundamental neste destaque econômico, uma vez que as relações entre esses fatores são biunívocas (Rodríguez, 2017).

Além de ser um dos principais centros econômicos do país, o Rio de Janeiro é conhecido internacionalmente por suas paisagens e pontos turísticos, sendo a única cidade brasileira presente na lista das 100 cidades mais visitadas no mundo (Euromonitor International, 2017). Deste modo, além da demanda de transportes da população, este município recebe diariamente diversos visitantes, impactando na economia e no sistema de transporte local.

Apesar da sua importância para a economia e para o turismo local, o sistema de transporte do Rio de Janeiro apresenta diversos problemas estruturais e de acessibilidade, deixando a desejar em diversos quesitos como, por exemplo, eficiência e segurança. Além disso, o elevado custo do transporte contrasta com a precariedade do serviço oferecido (Rodrigues, 2016b).

Deste modo, observa-se que o sistema de transporte urbano é um sistema complexo que envolve diversos fatores, tais como economia, população, meio ambiente e governo. Esses fatores estão inter-relacionados e interagem continuamente ao longo do tempo. Portanto, por ser composto e possuir diversas variáveis e *feedbacks* entre os subsistemas, não é apropriado que as características desse sistema sejam analisadas por meio de abordagens lineares como, por exemplo, uma regressão linear simples em que elementos são analisados de modo independente sem considerar outros fatores do sistema (Wang *et al.*, 2008).

Nesse sentido, a Dinâmica de Sistema (DS) é apontada como uma alternativa para a análise desses problemas, pois esta abordagem auxilia na compreensão de sistemas complexos (Sterman, 2001). Usado cada vez mais para projetar políticas em empresas e definir políticas públicas, a DS é um método eficiente para conseguir uma boa interpretação em situações de complexidade dinâmica e resistência política (Sterman, 2000).

Para Shepherd (2014), a abordagem holística da DS está bem adaptada aos atuais problemas do setor de transporte. Esta ferramenta é útil para o planejamento de transportes, bem como para os gestores que atuam na implementação de políticas de mobilidade urbana (Sayyadi; Awasthi, 2017; Batur e Koç, 2017).

Por ser uma temática importante, a gestão da mobilidade urbana vem despertando interesse no meio acadêmico e no setor público. Neste contexto, este estudo mostra-se relevante por contribuir para o processo de planejamento estratégico e tomada de decisão no que se refere à implementação da PNMU.

1.3 Procedimento Metodológico

Para alcançar o objetivo deste trabalho, foi definido um procedimento metodológico que pode ser representado por meio de um fluxograma (apresentado na Figura 1.2), segmentado em três etapas: Base Conceitual, Desenvolvimento do Modelo, e Simulação Computacional.

Com base nos objetivos definidos neste estudo, a Etapa 1 consiste na realização da revisão bibliográfica acerca do tema estudado. O primeiro passo está voltado para a pesquisa bibliográfica sobre a Política Nacional de Mobilidade Urbana em que são levantados os principais conceitos sobre mobilidade urbana, o processo de evolução das políticas de mobilidade urbana no Brasil, a PNMU em si e os desafios para a implementação da mesma. O segundo passo consiste na pesquisa bibliográfica sobre a Dinâmica de Sistemas, aprofundando nos conceitos e nos diagramas utilizados por esta abordagem. Além disso, a revisão bibliográfica aborda estudos relacionados a aplicação da DS na análise da mobilidade urbana. Por fim, a última etapa trata do levantamento de informações relacionadas a área de aplicação do estudo de caso, a cidade do Rio de Janeiro.

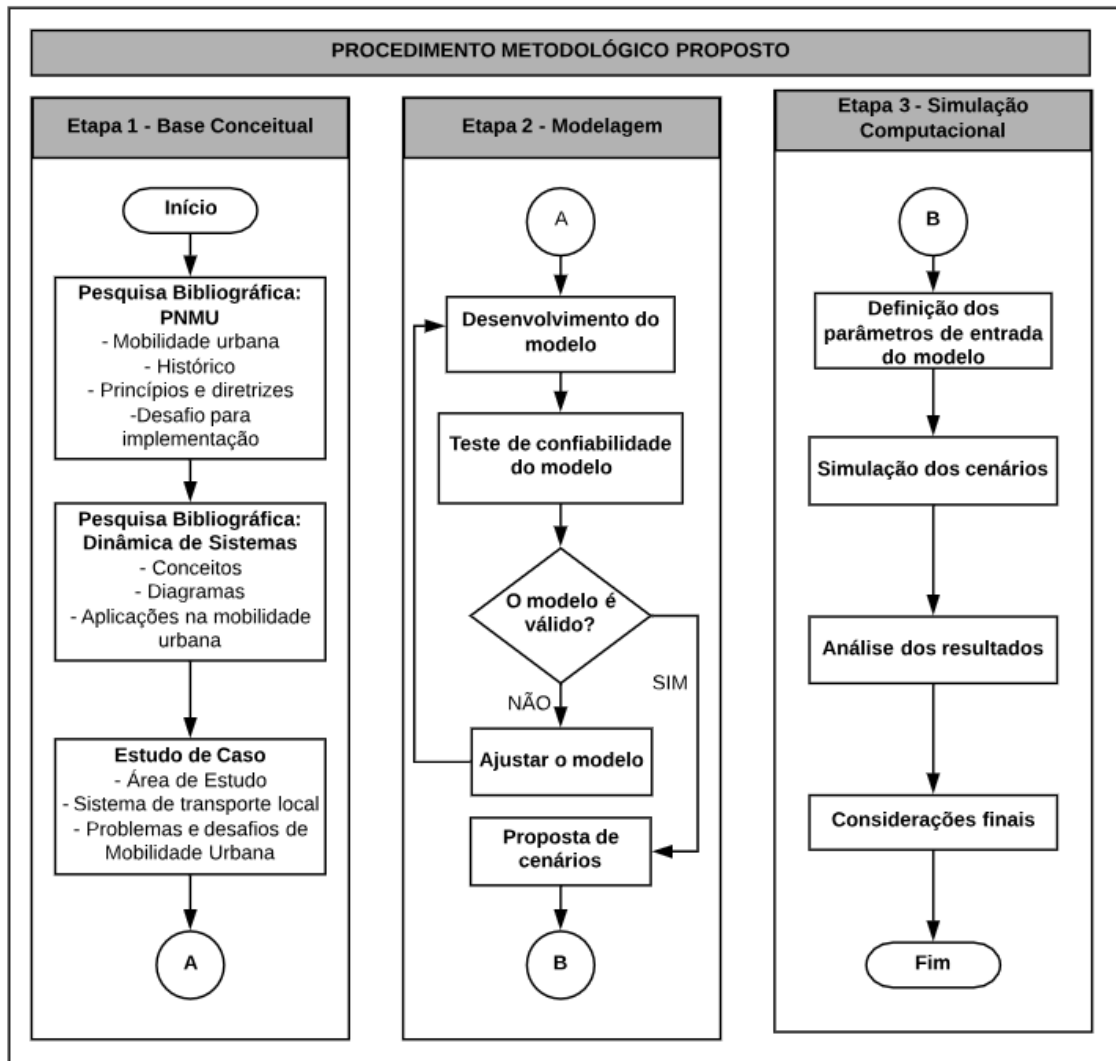


Figura 1.2 – Procedimento metodológico proposto

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nas informações levantadas na Etapa 1, o modelo proposto é desenvolvido na Etapa 2. Após o seu desenvolvimento, são realizados testes para verificar se o modelo está adequado a realidade. Caso não esteja, deve-se realizar alterações até que se obtenha resultados satisfatórios. Ainda na Etapa 2, são propostos cenários para serem utilizados na etapa seguinte de simulação do modelo proposto.

A terceira etapa consiste na simulação do modelo desenvolvido e testado na etapa anterior. Portanto, são realizados experimentos computacionais com os cenários estabelecidos. Ao final desta etapa, os resultados das simulações são representados a partir de tabelas e de gráficos acompanhados de uma análise. Vale ressaltar que, neste estudo, a simulação computacional foi executada por meio do *software* Vensim ®PLE (*Personal Learning Edition*). Para isso, utilizou-se uma versão gratuita deste aplicativo, fornecida pela Ventana Systems (2015), destinada ao uso pessoal e educacional. O último

passo deste procedimento consiste nas considerações finais da pesquisa. Com base nos resultados obtidos, são apresentadas as principais descobertas, sugestões de melhorias e proposições de novos estudos.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em sete capítulos. Este capítulo introdutório apresentou uma contextualização do tema de pesquisa deste estudo, o problema de pesquisa, os objetivos geral e específicos, a justificativa do estudo e o procedimento metodológico adotado.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito da mobilidade urbana e das leis vigentes no país relacionadas a este tema. Deste modo, este capítulo apresenta os principais conceitos de mobilidade urbana, a evolução histórica do cenário político, a Política Nacional de Mobilidade Urbana e os desafios para sua implementação.

O Capítulo 3 apresenta o método empregado neste estudo, a Dinâmica de Sistemas (DS). Sendo assim, são abordados nesse capítulo os principais conceitos, tipos de diagramas e os testes dos modelos de simulação de DS. Além disso, ao final desse capítulo, são apresentados exemplos de aplicação de DS na análise da mobilidade urbana. Já o Capítulo 4 expõe de maneira detalhada o processo de desenvolvimento do modelo proposto.

O estudo de caso é apresentado no Capítulo 5, por meio da descrição da área de estudo e do sistema de transporte local. Esse capítulo também discute os principais problemas e desafios da mobilidade urbana no município do Rio de Janeiro. Por fim, o processo de obtenção dos parâmetros do modelo proposto é exibido bem como todas as considerações para a simulação do estudo de caso.

Além de apresentar os testes de confiabilidade do modelo proposto, o Capítulo 6 apresenta os cenários desenvolvidos e os resultados obtidos, bem como as análises a respeito dos mesmos. Por fim, o Capítulo 7 apresenta as considerações finais do trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

2 POLÍTICA NACIONAL DE MOBILIDADE URBANA

Antes de discutir a Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU) é necessário compreender o conceito de mobilidade urbana. Portanto, apresenta-se a seguir um breve resumo do processo de construção deste conceito. Posteriormente, aborda-se a evolução do cenário político em relação a mobilidade urbana no Brasil. Por fim, são apresentados os principais desafios para a implementação da mais recente política neste cenário, a PNMU.

2.1 Mobilidade Urbana

O termo mobilidade urbana é recente e possui diversas definições e acepções. Musselwhite e Haddad (2010) definem mobilidade urbana como a quantidade de viagens realizadas. Já Litman (2017) interpreta este termo como o movimento físico de pessoas e bens no espaço urbano, medido por viagens, distância e velocidade. Entretanto, o conceito de mobilidade vai além do número de deslocamentos realizados no espaço urbano.

De acordo com a Política Nacional de Mobilidade Urbana Sustentável,

“A mobilidade é um atributo associado às pessoas e aos bens; corresponde às diferentes respostas dadas por indivíduos e agentes econômicos às suas necessidades de deslocamento, consideradas as dimensões do espaço urbano e a complexidade das atividades nele desenvolvidas” (Brasil, 2004b, p. 13).

De maneira geral, a mobilidade urbana consiste na capacidade de deslocamentos das pessoas e de bens no espaço urbano, envolvendo variáveis tão complexas quanto as variáveis que constituem a cidade (Kneib, 2012).

A mobilidade resulta da interação entre os deslocamentos de pessoas e bens nas cidades com os modos de transporte, serviços e infraestruturas. Esta interação “[...] fornece um paradigma alternativo para investigar a complexidade das cidades e fortalecer os vínculos entre o uso do solo e o transporte” (Banister, 2008, p. 73). Sendo assim, a mobilidade urbana é um atributo da cidade, o qual é determinado pelo desenvolvimento socioeconômico, pela apropriação do espaço e pela evolução tecnológica (Brasil, 2005).

Neste contexto, observa-se que os fatores que influenciam a mobilidade urbana são as dimensões do espaço urbano, a qualidade dos acessos, estradas e rodovias, o grau de dificuldade das atividades desenvolvidas no espaço urbano, a qualidade dos modos de transporte e as características da população, principalmente as relacionadas a renda, faixa etária e gênero (Costa, 2008).

O conceito de mobilidade urbana é resultante de um longo e amplo processo de discussão e é baseado no conceito de desenvolvimento sustentável (Seabra *et al.*, 2013). Segundo Silva (2009), a mobilidade urbana sustentável é uma extensão deste conceito com uma abrangência mais complexa e diversificada, pois está associada com a capacidade das pessoas realizarem os deslocamentos necessários para a execução de suas atividades básicas de maneira econômica e com o menor impacto possível ao meio ambiente.

Segundo Kayal *et al.* (2014, p.11), “mobilidade urbana sustentável é o sistema que incorpora viabilidade econômica, estabilidade ambiental e equidade social por meio da demanda de transporte e o uso do solo de maneira eficiente pela atual geração e gerações futuras”. Em outras palavras, a mobilidade urbana funciona como um mecanismo de construção da vida urbana que coopera com a sua organização por meio da interação do uso da terra, meio ambiente e outros subsistemas (Macário, 2007).

Além da expansão do tema para além dos aspectos relativos ao tráfego, estes conceitos relacionam a mobilidade a outros aspectos importantes, tal como a acessibilidade. Para Portugal *et al.* (2017), a acessibilidade está associada a diversos fatores, dependendo principalmente da articulação entre os transportes e o uso do solo. Segundo VTPI (2017), acessibilidade consiste na capacidade de atingir bens desejados, serviços, atividades e destinos, ou seja, refere-se ao acesso físico aos bens, serviços e destinos (também chamado de oportunidades) que as pessoas costumam realizar com transporte. Portanto, assim como “um automóvel é uma máquina de mobilidade, uma cidade é uma máquina de acessibilidade” (Litman, 2017, p. 1).

A acessibilidade é uma medida de mobilidade, ou seja, é uma medida de oferta que não descreve o comportamento do usuário (Jones, 1987). A mobilidade urbana e a acessibilidade possuem uma relação proporcionalmente direta, ou seja, o aumento da primeira acarreta em um aumento da segunda. Isso ocorre, porque quanto maior for o número de viagens e mais rápido as pessoas puderem viajar, mais oportunidades poderão ser alcançadas pelas mesmas (Litman, 2017).

A mobilidade e a acessibilidade urbana são conhecidas pelo uso prevalecente do transporte individual e particular, em detrimento do público e coletivo. Realizar decisões para melhorar a mobilidade urbana gera escolha (*trade-offs*) entre esses fatores, como, por exemplo, uma melhoria nas rodovias pode melhorar o acesso dos carros, porém pode dificultar o acesso por outros modos e reduzir o acesso dos pedestres e ciclistas (Litman, 2014). Ainda de acordo com Litman (2014), estudos apontam que mudanças no sistema

de transporte tendem a melhorar o tráfego de veículos em detrimento da acessibilidade em geral, reduzindo a eficiência dos outros modos e estimulando o desenvolvimento disperso.

A Gestão da Mobilidade, também conhecida como Gestão da Demanda dos Transportes – TDM (da sigla em inglês para *Transportation Demand Management*), consiste em um conjunto de estratégias que incentivam a substituição do transporte motorizado individual por outros modos de viagem (Litman, 2003). Além disso, a TDM busca reduzir a necessidade de viajar, reduzir as distâncias das viagens e aumentar a eficiência do sistema de transporte (Banister, 2008).

Em outras palavras, a TDM é um processo de planejamento que envolve diversos atores da sociedade com diferentes objetivos e interesses e, por isso, as decisões resultam em uma disputa política entre esses atores (Seabra, 2013). Sendo assim, a TDM envolve as dimensões política e social, buscando reduzir os efeitos negativos dos transportes a partir da criação de alternativas mais sustentáveis.

A TDM é uma maneira de modernizar os atuais sistemas de mobilidade urbana, de modo que as restrições econômicas, ambientais e institucionais sejam limitadas e sustentáveis, aumentando a mobilidade pessoal (Spickermann *et al.*, 2014). Este processo de planejamento é uma área de política pública que busca promover o desenvolvimento orientado para transportes públicos e áreas de desenvolvimento de transportes (Banister, 2008).

Em suma, a gestão da mobilidade consiste em alterar, por meio de um conjunto de estratégias, o comportamento das pessoas para aumentar o uso eficiente dos transportes (VTPI, 2014). Por isso, existe um grande número de estratégias da TDM com diferentes abordagens. A Tabela 2.1 apresenta algumas estratégias classificadas em quatro tipos de abordagem: Melhorar opções de transporte; Incentivos; Gestão do uso do solo e; Políticas e programas.

Existem várias estratégias da TDM com diferentes abordagens para influenciar as decisões de viagem (VTPI, 2014). Algumas estratégias tem o intuito de melhorar as opções de transporte disponíveis como, por exemplo, melhorias no trânsito, compartilhamento de carro por pessoas com o mesmo destino, teletrabalho (uma forma de trabalho sustentável que significa trabalho à distância por meio de ferramentas telecomunicacionais e de informação), entre outras. Algumas estratégias fornecem incentivos financeiros para que as pessoas mudem o modo de viagem como, por exemplo,

taxas baseadas na distância percorrida pelo usuário, taxa de estacionamento e incentivo aos não motorizados.

Tabela 2.1 - Estratégias da Gestão da Mobilidade (TDM)

Melhorar as Opções de Transporte	Incentivos	Gestão do Uso do Solo	Políticas e Programas
Melhorias no trânsito	Taxas rodoviárias	Crescimento Inteligente	Programas de TDM
Melhorias dos Não Motorizados	Taxas baseadas na distância	Novo urbanismo	Redução de poluentes por meio de transportes coletivos
Viagem compartilhada (<i>Rideshare</i>)	Incentivos financeiros para mudança de modo	Desenvolvimento comercial e residencial em locais estratégicos	Gestão do transporte em campi universitários
Horário flexível	Taxas de estacionamento	Gestão do estacionamento	Gestão do transporte de mercadorias
Compartilhamento de carro	Seguro com base no uso de veículos	Desenvolvimento orientado ao transporte público	Gestão do transporte turístico
Teletrabalho	Aumento de impostos	Reconstruir compactos ambientes urbanos	Marketing da TDM
Melhorias dos táxis	Incentivo aos Não Motorizados	Alterar as vias para retardar ou reduzir a circulação de veículos	Planejamento do custo mínimo
Integração bicicletas/trânsito			Reforma do mercado
Carona garantida para casa			Avaliação de desempenho
Via de prioridade para veículos de alta ocupação			

Fonte: VTPI (2014).

Melhorar o uso do solo é a base de algumas estratégias da TDM, alguns exemplos de estratégias com essa abordagem são: desenvolvimento comercial e residencial em locais estratégicos com o objetivo de reduzir deslocamentos, alterar as vias para retardar ou reduzir a circulação de veículos de modo que desestimule a realização de viagens e o crescimento inteligente do espaço urbano. Por fim, existem algumas estratégias que envolvem reformas da política de transportes e o desenvolvimento de novos programas que forneçam uma base para a TDM, tais como a redução de poluentes por meio de transportes coletivos, gestão do transporte dentro das universidades, gestão de transportes turísticos e desenvolvimento de programas de TDM.

Os principais conceitos e princípios de mobilidade destacam a importância da intervenção dos governos por meio de políticas para proporcionar um fluxo adequado de pessoas e bens de modo que atenda a demanda da população (Béhar; Dourado, 2015). Logo, a mobilidade deve ser objeto de prioridade das administrações públicas (Resende;

Sousa, 2009). Devido a importância das políticas que apoiam a mobilidade urbana, este assunto é abordado a seguir.

2.2 A Evolução das Políticas de Mobilidade Urbana no Brasil

O conceito de mobilidade é recente e, conseqüentemente, as políticas que abordam este tema. A discussão sobre essa temática teve início devido ao processo de urbanização no Brasil, tendo a Constituição da República Federativa do Brasil de 1988 como o seu marco inicial. A carta magna de 1988 estabelece a Política Urbana no Capítulo II do Título VII e, por meio dos artigos 182 e 183, garante o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e o bem-estar de seus habitantes (Brasil, 2016). Deste modo, a Constituição Federal garante o direito de ir e vir que é o princípio básico da mobilidade urbana.

Para Affonso *et al.* (2009), este foi um grande passo para a construção do conceito de mobilidade, pois a Constituição proporciona autonomia e liberdade para os indivíduos apropriarem e circularem livremente no espaço público, tendo acesso às oportunidades.

Publicado em 2001, o Estatuto da Cidade, Lei nº 10.257 de 10/09/2001, regulamenta os artigos 182 e 183 da Constituição Federal, estabelecendo diretrizes gerais da política urbana. Esta Lei estabelece normas de ordem pública e interesse social que regulamentam o uso do espaço urbano de maneira sustentável para a segurança e o bem-estar dos cidadãos (Brasil, 2002).

Do ponto de vista da mobilidade urbana, o Estatuto da Cidade estabelece que a política urbana garantida aos cidadãos o “[...] direito a cidades sustentáveis, entendido como o direito à terra urbana, à moradia, ao saneamento ambiental, à infraestrutura urbana, ao transporte e aos serviços públicos, ao trabalho e ao lazer, para as presentes e futuras gerações” (Brasil, 2001).

Apesar de dar uma maior ênfase ao aspecto social da política urbana, esta Lei não foi muito além dos parâmetros e diretrizes oferecidos pela Constituição Federal (Bicudo, 2008). Entretanto, vale ressaltar que, diferente das leis anteriores, o Estatuto da Cidade, no capítulo da Política Urbana, aborda o plano diretor como tema central (Pinto, 2014).

O plano diretor é um instrumento básico da política de desenvolvimento e de expansão urbana e é obrigatório para municípios com mais de 20 mil habitantes (Brasil, 2001). Este plano deve ser aprovado na Câmara Municipal e “[...] deve ser a grande referência de padrões e metas, estabelecendo proibições, mostrando tendências, obrigando certas condutas, enfim, consagrando os valores locais para que se alcance a

qualidade de vida urbana” (Di Sarno, 2004, p. 97). Já os municípios com mais de 500 mil habitantes devem possuir o plano de transporte urbano integrado, o qual deve estar de acordo com o plano diretor (Brasil, 2001).

Outro evento importante para a construção do conceito de mobilidade foi a criação do Ministério das Cidades em 2003. A Secretaria Nacional de Transporte e da Mobilidade Urbana (SEMOB) integra esse ministério e possui a finalidade de formular e implementar uma política de mobilidade urbana sustentável (Brasil, 2015a).

Para a promoção da mobilidade urbana sustentável e cidadania no trânsito, a Política Nacional de Desenvolvimento Urbano (PNDU) estabeleceu objetivos em três campos estratégicos de ação (Brasil, 2004a):

- Desenvolvimento urbano: integração entre transporte e controle territorial, redução das deseconomias da circulação e a oferta de transporte público eficiente e de qualidade;
- Sustentabilidade ambiental: uso equânime do espaço urbano, a melhoria da qualidade de vida, a melhoria da qualidade do ar e a sustentabilidade energética; e
- Inclusão social: acesso democrático à cidade e ao transporte público e a valorização da acessibilidade universal e dos deslocamentos de pedestres e ciclistas.

Por último, em 2012 houve um grande avanço em termos de políticas públicas de mobilidade urbana com a publicação da Política Nacional de Mobilidade Urbana. Esta lei é o resultado de um processo de 17 anos e sua aprovação é um marco importante na gestão das políticas públicas das cidades brasileiras (Brasil, 2015b). Devido a sua importância, a seguir é apresentada uma discussão sobre esta Lei.

2.3 Decreto-Lei Nº 12.587/2012

O Decreto-Lei Nº 12.587/2012 de 3 de janeiro de 2012 objetiva a integração entre os diferentes modos de transporte e a melhoria da acessibilidade e da mobilidade no espaço urbano. Com o objetivo de otimizar o espaço urbano, esta Lei é voltada para os interesses e necessidades da coletividade urbana, sendo direcionada à gestão municipal e as implicações urbanísticas (Milaré, 2016). O grande enfoque desta política é a priorização dos modos não motorizados e do transporte coletivo e o incentivo do uso consciente do transporte individual (Sudário; Hernandez, 2014).

Esta Lei tem como intuito estabelecer diretrizes para amparar as cidades na melhoria da acessibilidade e mobilidade nos municípios. Para facilitar o processo de implementação desta política, os artigos 5º a 7º dessa Lei estabelecem de forma clara e objetiva os princípios, diretrizes e objetivos da PNMU.

Os princípios abordam os conceitos básicos para a compreensão do texto dessa Lei e podem servir como base para elaboração de novas normas. Deste modo, os princípios dela são: a acessibilidade universal; o desenvolvimento sustentável; a equidade ao acesso do transporte coletivo público; eficiência, eficácia e efetividade na prestação de serviços de transporte e na circulação urbana; segurança nos deslocamentos; justa distribuição dos benefícios e ônus no uso dos diferentes modos e equidade no uso do espaço público de circulação de vias e logradouros (Brasil, 2012).

Segundo Oliveira Júnior (2012), as diretrizes desta Lei ressaltam a importância de integrar políticas que foram elaboradas isoladamente, mas que possuem um grande potencial para a resolução dos problemas do espaço urbano. Sendo assim, as diretrizes desta Lei são: o Planejamento Integrado; Integração entre modos e serviços; Mitigação dos custos ambientais, sociais e econômicos; Desenvolvimento científico-tecnológico; Energias renováveis e menos poluentes e estruturadores do território e indutores do desenvolvimento urbano integrado (Brasil, 2012).

Para Silva (2013), essas diretrizes consistem em uma série de ferramentas para auxiliar a gestão municipal no desenvolvimento urbano, expandindo o conceito da mobilidade urbana para um contexto mais amplo que lhe é inerente. Já os objetivos reforçam a necessidade de elaborar e implantar programas e ações governamentais para que esta Lei seja efetiva (Oliveira Júnior, 2012).

De acordo com o Art. 7º desta Lei, os objetivos da PNMU são: Reduzir as desigualdades e promover a inclusão social; Promover o acesso aos serviços básicos e equipamentos sociais; Proporcionar melhoria nas condições urbanas da população no que se refere à acessibilidade e à mobilidade; Promover o desenvolvimento sustentável com a mitigação dos custos ambientais e socioeconômicos dos deslocamentos de pessoas e cargas nas cidades e; Consolidar a gestão democrática como instrumento e garantia da construção contínua do aprimoramento da mobilidade urbana.

O Artigo 24 desta Lei determina que todas as cidades brasileiras com mais de 20 mil habitantes são obrigadas a elaborar seus planos de mobilidade (Brasil, 2012). Também devem possuir o plano de mobilidade os municípios:

- i. Integrantes de regiões metropolitanas e aglomerações urbanas;

- ii. Integrantes de áreas de especial interesse turístico;
- iii. Inseridos na área de influência de empreendimentos ou atividades com significativo impacto ambiental de âmbito regional ou nacional;
- iv. Incluídos no cadastro nacional de Municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos (Incluído pela Lei nº 12.608, de 2012); e
- v. Onde o Poder Público municipal pretenda utilizar os instrumentos previstos no § 4º do Art. 182 da Constituição Federal.

Este plano deve ser integrado e compatível ao plano diretor e, para os municípios sem sistema de transporte público, deve ser focado no transporte não motorizado. Além disso, os municípios menores podem inserir o Plano de Mobilidade (PlanMob) no Plano Diretor (Milaré, 2016).

Esta Lei estabelece o prazo de três anos (expirado em 2015) para que todos os municípios que se enquadrem no perfil elaborem os seus planos. Entretanto, a Medida Provisória 748/16 amplia este prazo para sete anos, ou seja, prorroga o prazo para 2019 (Brasil, 2016b). Esses planos devem ser revisados e atualizados, no mínimo, uma vez a cada 10 anos. Os municípios que não cumprirem esta norma estarão impedidos de receber recursos federais destinados a mobilidade urbana até que atendam às exigências da PNMU.

O PlanMob é um mecanismo de orientação da política urbana que auxilia o processo de consolidação, renovação e controle da expansão urbana (Brasil, 2007). Para a elaboração do Plano de Mobilidade, o Ministério das Cidades definiu dez princípios para o planejamento urbano:

- Diminuir a necessidade de viagens motorizadas, posicionando melhor os equipamentos sociais, descentralizando os serviços públicos, ocupando os vazios urbanos, favorecendo a multi-centralidade, como formas de aproximar as oportunidades de trabalho e a oferta de serviços dos locais de moradia;
- Repensar o desenho urbano, planejando o sistema viário como suporte da política de mobilidade, com prioridade para a segurança e a qualidade de vida dos moradores em detrimento da fluidez do tráfego de veículos;
- Repensar a circulação de veículos, priorizando os meios não motorizados e de transporte coletivo nos planos e projetos - em lugar da histórica predominância

dos automóveis - considerando que a maioria das pessoas utiliza estes modos para seus deslocamentos e não o transporte individual. A cidade não pode ser pensada como, se um dia, todas as pessoas fossem ter um automóvel;

- Desenvolver os meios não motorizados de transporte, passando a valorizar a bicicleta como um meio de transporte importante, integrando-a com os modos de transporte coletivo;
- Reconhecer a importância do deslocamento dos pedestres, valorizando o caminhar como um modo de transporte para a realização de viagens curtas e incorporando definitivamente a calçada como parte da via pública, com tratamento específico;
- Reduzir os impactos ambientais da mobilidade urbana, uma vez que toda viagem motorizada que usa combustível, produz poluição sonora, atmosférica e resíduos;
- Propiciar mobilidade às pessoas com deficiência e restrição de mobilidade, permitindo o acesso à cidade e aos serviços urbanos;
- Priorizar o transporte público coletivo no sistema viário, racionalizando os sistemas, ampliando sua participação na distribuição das viagens e reduzindo seus custos, bem como desestimular o uso do transporte individual;
- Promover a integração dos diversos modos de transporte, considerando a demanda, as características da cidade e a redução das externalidades negativas do sistema de mobilidade; e
- Estruturar a gestão local, fortalecendo o papel regulador dos órgãos públicos gestores dos serviços de transporte público e de trânsito.

Vale ressaltar que ao priorizar modos não motorizados e o transporte público, esta política não busca eliminar o transporte individual. Esta Lei parte de um princípio de inclusão, acessibilidade e equidade social, buscando a construção de um espaço urbano onde os modos não motorizados possam também operar com segurança e fluidez (Alves, 2014).

Para atingir os objetivos desta política é necessário que a União, Estados e Municípios trabalhem em conjunto de maneira integrada. Segundo esta Lei, cabe a União fomentar a implementação de projetos, oferecer suporte técnico e financeiro para os demais entes federados e fornecer um sistema nacional de informações sobre mobilidade urbana. Os estados devem realizar incentivos financeiros e fiscais para gerar uma redução dos custos de transporte público e, conseqüentemente, um aumento na qualidade desses

serviços. Por fim, os municípios são responsáveis por realizar o planejamento, a organização e a execução da política de mobilidade urbana.

2.4 Desafios para a implementação da PNMU

Entre os diversos fatores que afetam os níveis de mobilidade, Gakenheimer (1999) aponta como os principais: o crescente aumento da motorização, a demanda de viagens superior a capacidade das instalações, a incompatibilidade da estrutura urbana com o aumento da motorização, a ausência de uma relação mais forte entre transporte e uso da solo e a falta de manutenção adequada das vias.

Para Kneib (2012), o grande desafio é quebrar o paradigma de valorização do automóvel, ou seja, convencer a sociedade que uso inconsciente de motos e carros é prejudicial as cidades. Portanto, é necessário uma maior discussão e compreensão do conceito de mobilidade por todos agentes do sistema.

Muitos autores apontam a necessidade dos governos em tratarem a mobilidade como o resultado de uma política pública, isso porque “a solução dos problemas de mobilidade [...] é deixada na esfera privada, como resultado das escolhas individuais por modo de transporte, conforme a renda das pessoas” (Boareto, 2008, p. 159).

Apesar de ser obrigatório e pré-requisito para a aquisição de recursos federais, muitos municípios com mais de 20.000 habitantes não elaboraram seus Planos de Mobilidade, resultando em um desenvolvimento desordenado do espaço urbano (Sudário; Hernandez, 2014). Segundo Venter (2016), o descumprimento do Estatuto da Cidade ocorreu principalmente nas cidades menores por razões políticas ou por falta de recursos (humanos e econômicos). A Figura 2.1 apresenta o percentual da situação dos planos diretores entre os anos de 2005 e 2015.

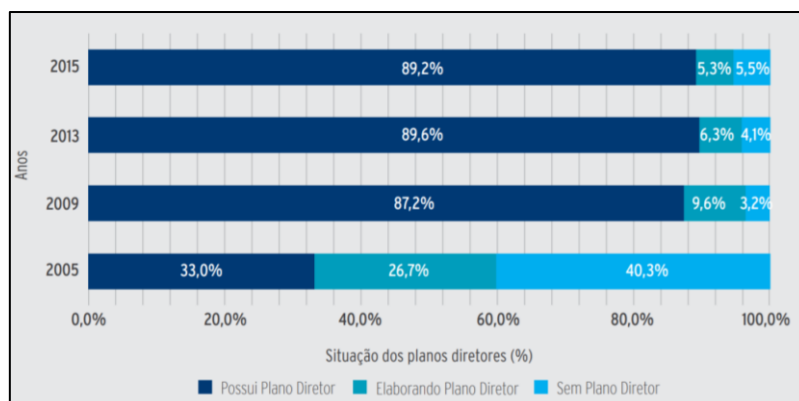


Figura 2.1 – Situação dos Planos Diretores em municípios com mais de 20.000 habitantes

Fonte: CNT e NTU (2017, p.15).

Sobre a PNMU, os principais desafios para a implementação são: a integração das Políticas Públicas, a priorização do transporte não motorizado e do transporte coletivo, fontes de financiamento e novas tecnologias (Brasil, 2015c). Quanto às políticas públicas, deve-se integrar não apenas as políticas relacionadas ao desenvolvimento urbano, mas também as demais políticas que influenciam diretamente este campo como, por exemplo, a política de redução do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) para automóveis.

Outro grande desafio no Brasil é a baixa priorização dos investimentos federais em mobilidade urbana. Sendo assim, observa-se a necessidade do desenvolvimento de novas fontes de financiamento da mobilidade urbana. Por fim, a migração do transporte individual para o coletivo pode ser incentivada pelo uso de tecnologias da informação que melhorem o gerenciamento dos sistemas de transportes. Entretanto, são necessários altos investimentos na mobilidade urbana para que se torne possível o emprego dessas tecnologias.

Sudário e Hernandez (2014) apontam como gargalos do processo de implementação da PNMU: a necessidade de maior discussão sobre o que é mobilidade juntamente com a população; Desqualificação dos gestores municipais; Ausência de profissionais da área urbana na gestão pública; Ausência de anseio e vontade política para a elaboração e/ou implantação; Fragmentação das atividades de implantação; Ausência de recursos financeiros destinados exclusivamente a elaboração de PlanMobs; e Descontinuidade nas atividades de gestão da mobilidade urbana municipal quando da mudança de governos.

Apesar do longo processo de tramitação no Congresso Nacional, alguns tópicos da PNMU precisam ser revisados. Machado e Piccinini (2018) apontam a necessidade de sistematizar/compilar as normas, os critérios e os padrões existentes para as ações mínimas exigidas por esta política para facilitar a implementação da mesma.

Rubim e Leitão (2013) destacam três fragilidades desta política. A primeira é a não previsão da forma jurídica do Plano de Mobilidade Urbana, ou seja, como ele será apresentado (na forma de lei ordinária, uma simples apresentação de slides, entre outros). Os autores também apontam a ausência da descrição do processo de avaliação dos planos apresentados. Por fim, é destacada a superficialidade em que é discutido o papel do governo federal em todo esse processo.

A PNMU não apresenta um modelo padrão ou um procedimento para o desenvolvimento dos planos de mobilidade. Esta fragilidade pode ser justificada pelo fato

do Brasil ser um país com um vasto território, com diferentes regiões e, conseqüentemente, possui cidades com características próprias. Em outras palavras, as cidades apresentam suas particularidades, tornando impossível o desenvolvimento de uma solução única, fazendo com que os planos de mobilidade possuam características distintas (Silva *et al.*, 2008).

Mendes e Ceroy (2015) apontam a ausência do fenômeno da *sharing economy*. Apesar de ter sido promulgada em 2012, o texto original da Lei não aborda este novo conceito de transporte individual privado que vem sendo oferecido por muitas empresas do setor e cada vez mais é utilizado pela população. Diferente do serviço prestado pelos taxistas (transporte individual público), o *sharing economy* não é conceituado e nem regulamentado, o que não significa ilegalidade deste serviço.

Apesar de ser um grande avanço na busca da mobilidade urbana, é necessário o engajamento da população e dos governantes para que a PNMU seja cumprida. Além disso, observa-se que as medidas desta Lei devem ser implementadas de maneira gradual, respeitando as particularidades de cada cidade. Portanto, apenas com o planejamento urbano e o cumprimento efetivo desta política que se poderá pensar uma mobilidade urbana sustentável, acessível, inclusiva e segura nos municípios (Alves, 2014).

Por fim, vale destacar que o cenário urbano sugerido pela PNMU é distante, mas não é inatingível. Assim como em outras políticas, esta Lei exigirá esforços em educação ambiental e o cultivo de novos valores sociais, ou seja, o cidadão, que é o maior beneficiário dessa política, deverá ser um agente colaborador (Milaré, 2016).

2.5 Considerações Finais

Com o intuito de identificar os fatores que influenciam a mobilidade urbana e, conseqüentemente, a implementação da PNMU, este capítulo apresentou os principais conceitos relacionados a mobilidade urbana e a esta política. Além de permitir a compressão sobre a temática, a revisão apresentada neste capítulo permite identificar fatores que devem ser levados em consideração no processo de desenvolvimento do modelo proposto neste estudo.

Observou-se que o grande enfoque da PNMU é a priorização do transporte não motorizado e do transporte público em detrimento do transporte individual. Outro ponto ressaltado é a importância da implementação da PNMU para reduzir as externalidades negativas do transporte como, por exemplo, o congestionamento e a emissão de

poluentes. Devido a esse destaque na PNMU, esses fatores serão abordados no processo de desenvolvimento do modelo proposto que será apresentado no Capítulo 4.

Conforme discutido neste capítulo, existem diversos desafios para a implementação a PNMU o que estimula a realização de estudos nesta área. Sabe-se que métodos e ferramentas são comumente utilizados em estudos de engenharia e, por isso, a seguir é apresentado o método da Dinâmica de Sistemas, o qual será utilizado no desenvolvimento do modelo proposto nesta dissertação.

3 DINÂMICA DE SISTEMAS

Criada na década de 50 por Jay Forrester, no Massachusetts Institute of Technology – MIT, Cambridge, EUA, a Dinâmica de Sistemas (DS) é uma abordagem interdisciplinar que auxilia a compreensão de sistemas complexos. Por meio da construção de modelos representativos, este método permite simular o comportamento do sistema ao longo do tempo, reproduzindo os comportamentos problemáticos e avaliando os impactos de novas políticas neste sistema (Chaim, 2009).

Um sistema é um conjunto de elementos inter-relacionados que produzem o seu próprio padrão de comportamento ao longo do tempo (Meadows, 2008). Devido as interações dos seus componentes, os sistemas são dinâmicos e estão em contínua modificação. Portanto, o estado atual de um sistema depende dos estados anteriores e o seu comportamento é determinado pela sua estrutura (Richardson; Pugh, 1989; Sterman, 2000).

A DS é uma ferramenta de modelagem e simulação que possui a capacidade de representar a complexidade, a não linearidade e os *loops* de causalidade presentes em sistemas físicos e sociais (Forrester, 1994). O objetivo dessa abordagem é compreender como e por que as interações do sistema são geradas e propor medidas que melhorem desempenho do mesmo (Wen; Bai, 2017).

Este método emprega modelos mentais que facilitam a compreensão das relações existentes entre os componentes de um sistema e, por isso, é uma excelente ferramenta de suporte no processo de tomada de decisão (Shepherd, 2014). O diferencial da modelagem de DS é a sua eficácia em descrever os sistemas por meio de uma lógica sistêmica que apresenta as relações circulares de causa e efeito, circuitos de retroalimentação e atrasos (Liu *et al.*, 2010). Outro ponto importante é que esta abordagem de modelagem considera o sistema como um todo, representando sistemas agregados e capturando a complexidade dinâmica de sua evolução (Sayyadi; Awasthi, 2017; Bernardino; Hoofd, 2013).

Como pode ser visto na Figura 3.1, o processo de modelagem não é uma sequência linear de passos, mas sim um processo de *feedback*. Sendo assim, para representar sistemas reais, os modelos passam por constantes interações, questionamentos, testes e refinamentos. Para Sterman (2000), existem cinco passos fundamentais no processo de modelagem:

- **Articulação do problema:** deve-se identificar qual é o problema, descobrir porque ele existe e analisar se o mesmo é realmente um problema ou apenas uma dificuldade. Além disso, são definidas as variáveis e os conceitos importantes para o entendimento do problema e o horizonte de tempo necessário para descrever os seus sintomas e capturar os efeitos de potenciais políticas;
- **Hipótese dinâmica:** desenvolver uma teoria (hipótese dinâmica) para explicar, por meio da interação das variáveis e agentes representados no modelo, o comportamento problemático. Para isso é necessário a realização de mapas de estruturas causais (Diagrama de Causa e Efeito e o Diagrama de Estoque e Fluxo) baseados nas hipóteses e variáveis;
- **Formulação:** especificação do modelo por meio do estabelecimento de parâmetros, condições iniciais e o equacionamento das variáveis. Também são realizados alguns testes para identificar falhas nas formulações propostas e melhorar a compreensão do sistema;
- **Teste:** comparação do comportamento simulado com o comportamento real do sistema. Nesta etapa, é verificada a consistência dimensional, o comportamento em condições extremas e a sensibilidade do modelo; e
- **Avaliação e formulação de políticas:** formulação e análise dos efeitos de novas estratégias, estruturas e regras de decisão. Para isso, cenários são criados para verificar o desempenho e a robustez das políticas.

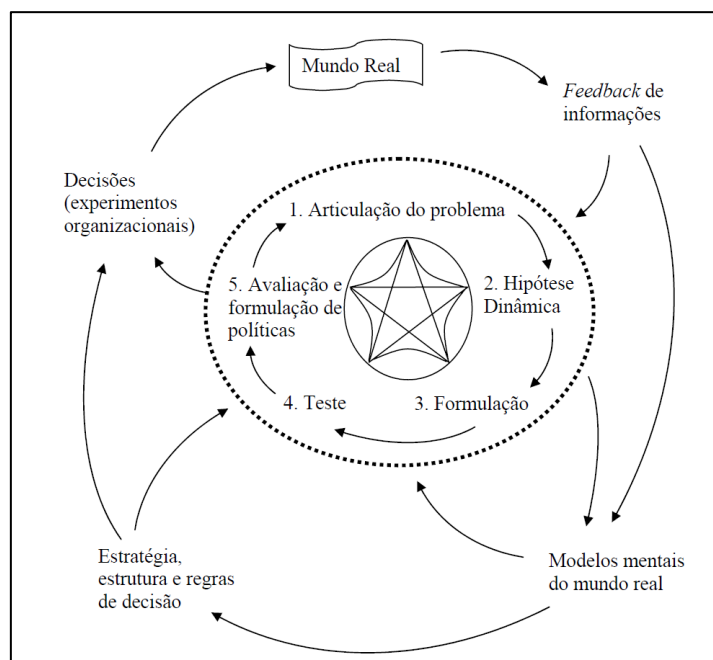


Figura 3.1 – Processo de Modelagem
 Fonte: Sterman (2000, p. 88).

Em suma, a DS é um método que emprega abordagens quantitativa e qualitativa e, a partir da modelagem e simulação, auxilia o processo de tomada de decisões em sistemas complexos. A abordagem qualitativa é empregada na articulação do problema e na definição da hipótese dinâmica, enquanto que a abordagem quantitativa é empregada nas fases posteriores (Fernandes, 2003). Para isso, este método utiliza dois diagramas: o Diagrama de Causa e Efeito e o Diagrama de Estoque e Fluxo que são apresentados a seguir.

3.1 Diagrama de Causa e Efeito

O Diagrama de Causa e Efeito (DCE), também conhecido como diagrama de influência, é um mapa do sistema com todos os seus componentes e suas interações. Este diagrama consiste na etapa mais importante do desenvolvimento do modelo de DS em que a estrutura do sistema é apresentada por meio de ciclos de retroalimentação ou *feedback loops* (Haghshenas *et al.*, 2015).

De acordo com Raydugin (2017), um ciclo de retroalimentação “[...] é formado pelas relações causais das variáveis de um sistema, formando um ciclo de causalidade. [...] A causalidade é uma regra de “se então” que associa a causa e o efeito que uma variável independente produz em uma variável dependente”. Estes ciclos reproduzem as hipóteses a respeito das causas de dinâmica, ilustrando e facilitando o desenvolvimento de modelos mentais e facilitando a compreensão das respostas de *feedback* dinâmico de um sistema (Guimarães, 2007).

A relação causal indica o efeito direto de uma variável sobre a outra. As variáveis são conectadas por uma seta, que indica a direção da causalidade. Sendo assim, o componente que aparece no início da seta é a variável causa enquanto que o componente da ponta é a variável afetada. Além disso, essas setas apresentam um sinal positivo (+) ou negativo (-) que representa a relação entre as duas variáveis.

O sinal positivo indica uma relação proporcional entre as variáveis, ou seja, as variáveis mudam na mesma direção. Portanto, um aumento na variável causa produz um aumento na variável efeito e uma redução na variável causa produz uma redução na causa efeito. Já o sinal negativo tem um efeito oposto, ou seja, se a variável causa alterar, a variável efeito mudará na direção oposta. Neste caso, quando a variável causa aumenta, a variável efeito reduz e quando a variável causa reduz, a variável efeito aumenta (Coyle, 1996; Chaim, 2009; Bueno, 2014).

Além de apresentar como as variáveis estão relacionadas, os *loops* de *feedback* são responsáveis por produzir os mecanismos de reforço (*loops* positivos) e de equilíbrio (*loops* negativos), representados na Figura 3.2, fazendo com que um sistema cresça, decresça, oscile ou se mantenha estagnado (Fernandes, 2003; Georgiadis; Vlachos, 2004).

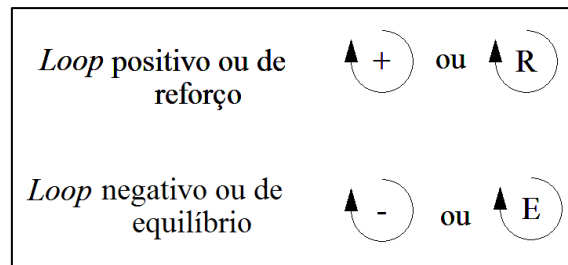


Figura 3.2 – Representação gráfica dos *loops* de reforço e equilíbrio
 Fonte: Sterman (2000, p. 138).

Para verificar o tipo de mecanismo produzido pelo ciclo de retroalimentação, é necessário analisar o efeito produzido por uma ação. O *loop* será de reforço se esta ação produzir uma variação no mesmo sentido, caso contrário este *loop* será de equilíbrio. Para exemplificar, a Figura 3.3 apresenta um DCE para a população de uma espécie.

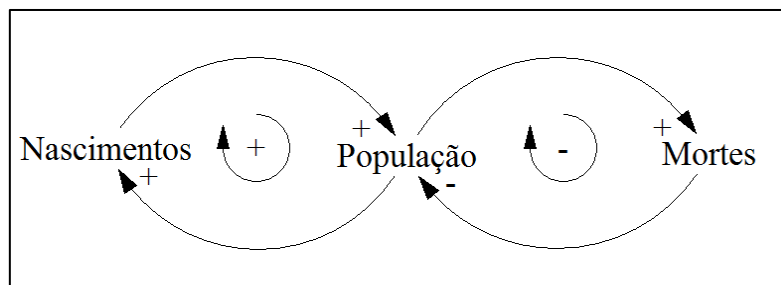


Figura 3.3 – DCE para a população de uma espécie
 Fonte: Adaptado de Sterman (2000, p.138).

Um aumento no número de nascimentos de uma determinada espécie faz com que o tamanho da população cresça. Consequentemente, uma maior população apresentará um número maior de nascimentos e, assim por diante. Neste caso, o primeiro *loop* é de reforço. Neste exemplo, a população aumentaria exponencialmente se esse fosse o único *loop* na operação, mas nenhuma população cresce infinitamente. Existem limites de crescimento, os quais são gerados pelos *loops* negativos (Sterman, 2000).

À medida que a população cresce, o *loop* negativo age para equilibrar essa mudança. O aumento da população aumenta a taxa de mortalidade, a qual reduz o tamanho da população. Sendo assim, o *feedback* é negativo (equilíbrio), pois o aumento

da variável inicial reduz a mesma, estabilizando o sistema. Portanto, os sistemas são constituídos por *feedbacks* positivos e negativos e as dinâmicas surgem da interação desses *loops*.

Deste modo, nota-se que os ciclos positivos apresentam o comportamento de crescimento, reforçando uma mudança, enquanto que os ciclos negativos apresentam a busca de objetivos (*goal seeking*), equilibrando o sistema (Ng *et al.*, 2012). Além desses dois modos de comportamento, existe o comportamento oscilatório. De acordo com Sterman (2000), a oscilação surge do *feedback* negativo com atrasos de tempo no *loop*. Os atrasos são esperas que fazem com que uma ação produza efeitos diferentes no tempo e espaço, gerando flutuações nos níveis de estoques de um sistema (Chaim, 2009). A Figura 3.4 apresenta um exemplo de comportamento oscilatório.

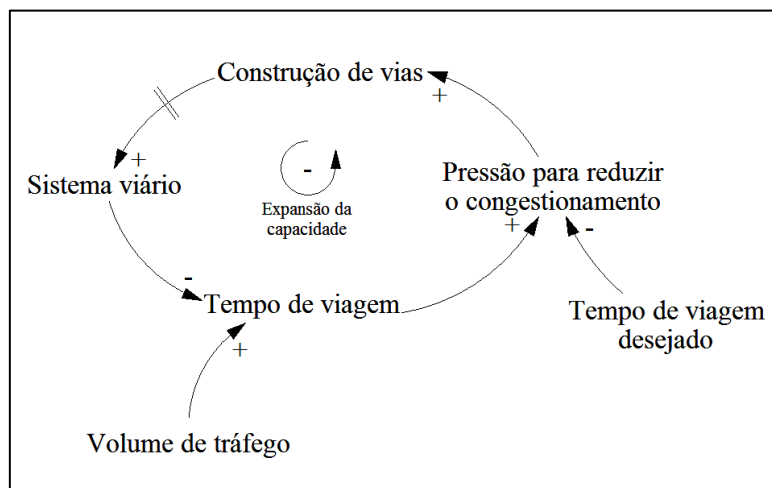


Figura 3.4 – DCE para o sistema viário

Fonte: Sterman (2000, p. 180).

À medida que aumenta o número de veículos nas vias, o tempo médio de viagem aumentará devido à restrição de capacidade da via. Quanto maior for a discrepância entre o tempo de viagem desejado e o tempo de viagem efetivo, maior será a pressão da população para reduzir o congestionamento. Uma solução tradicional para congestionamentos é a construção e/ou melhoria de vias. Entretanto, projetos rodoviários possuem uma duração, gerando um atraso no aumento da capacidade do sistema viário, que é representado no diagrama pelo duplo traço sobre a seta que conecta as variáveis “Construção de vias” e “Sistema viário”.

O comportamento oscilatório se diferencia do *goal seeking* por ultrapassar o objetivo ou o seu estado de equilíbrio. Os atrasos fazem com que as ações corretivas continuem sendo implementadas mesmo depois que o sistema atinja a sua meta, forçando-

o a se ajustar por meio de novas correções na direção oposta, ou seja, o sistema oscila ao redor do seu objetivo (Sterman, 2000).

Em síntese, um sistema de *feedback* existe quando uma decisão é tomada, resultando em uma ação que afeta o ambiente e, conseqüentemente, influencia as decisões futuras (Forrester, 1961). O DCE consiste na abordagem qualitativa do modelo de DS e é útil para compreensão da estrutura do sistema. Entretanto, os processos de tomada de decisão demandam formulação e teste de novas políticas para analisar os seus efeitos no sistema. Para isso, na DS é empregado o Diagrama de Estoque Fluxo que é a representação matemática do DCE por meio de uma linguagem gráfica, permitindo assim a simulação por computador (Angarita-Zapata *et al.*, 2016). Esse diagrama é apresentado a seguir.

3.2 Diagrama de Estoque e Fluxo

O Diagrama de Estoque e Fluxo (DEF) é uma forma de distinguir variáveis do sistema pelas acumulações e taxas de mudanças dos recursos (Sterman, 2000). Existem três tipos de variáveis: variável de nível (estoque), variável de taxa (fluxo) e variável auxiliar. Estas variáveis estão associadas por meio de equações que adquirem o formato integral, diferencial e/ou outros tipos (Wang *et al.*, 2008). Como pode ser visto na Figura 3.5, além das variáveis, o DEF também é constituído por conectores.

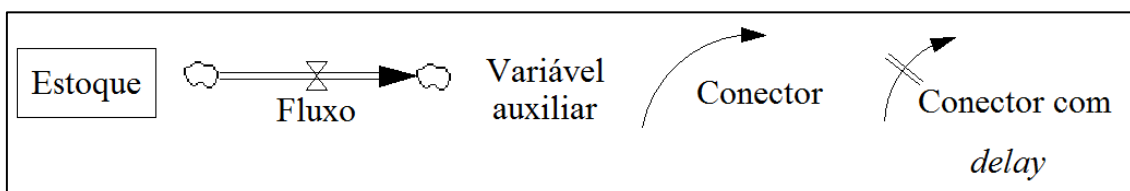


Figura 3.5 – Componentes do DEF

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os estoques (ou variáveis de nível) descrevem o efeito no sistema, representando a acumulação de um fluxo (material, tempo ou informação) (Liu *et al.* 2015). Essas variáveis definem as alterações no estado do sistema em um determinado período de tempo (Wang *et al.*, 2008). Os estoques representam o estado de um recurso e, por isso, podem ser qualquer coisa que pode ser acumulada (Azhaginiyal; Umadevi, 2014), como, por exemplo, o saldo de uma poupança, a quantidade de água em um copo, a quantidade de pessoas ou de um produto, entre outros.

Os fluxos (ou variáveis de taxa) são as ações, decisões e atividades que fazem com que o estado do sistema mude por meio do crescimento ou redução dos estoques (Abbas; Bell, 1994). Os fluxos podem ser associados com a movimentação de materiais e informações em um sistema. Este tipo de variável é representado por uma seta com uma válvula e nuvens nas extremidades (veja Figura 3.5). Segundo Chaim (2009), as válvulas são responsáveis por controlar os fluxos, enquanto que as nuvens determinam o limite do sistema, representando a origem ou o final de um fluxo.

Exibindo a situação de um sistema em um determinado período, os estoques fornecem informações para a tomada de decisão. Os fluxos de um sistema serão alterados por essas decisões que, conseqüentemente, modificarão os estoques, gerando novas informações e assim sucessivamente (Chaim, 2009). Sendo assim, de acordo com Sterman (2000), a estrutura do DEF é representada matematicamente como:

$$Estoque = \int_{t_0}^t [Fluxo\ de\ Entrada(s) - Fluxo\ de\ Saída(s)]dt + Estoque(t_0) \quad (3.1),$$

onde o fluxo de entrada representa o valor da entrada a qualquer momento s entre o tempo inicial t_0 e tempo atual t . De modo equivalente, a taxa líquida de mudança dos estoques pode ser representada pela seguinte equação diferencial:

$$\frac{d(Estoque)}{dt} = Variação\ Líquida\ do\ Estoque = Fluxo\ de\ Entrada - Fluxo\ de\ Saída \quad (3.2)$$

As variáveis auxiliares (ou conversores) podem armazenar informações sobre os estoques, fluxos ou informações externas ao sistema. Esse tipo de variável é responsável por conter valores constantes ou alterar, por meio de equações, os *inputs* do sistema, gerando *outputs* que influenciarão outra variável (Guimarães, 2007). Outro elemento chave da dinâmica de sistemas são os conectores. Os conectores são ligações de informação que estabelecem as relações entre os estoques, os fluxos e as variáveis auxiliares (Azhaginiyal; Umadevi, 2014).

A Figura 3.6 apresenta o DEF para a população de uma espécie. A população é uma variável de estoque determinada pelos fluxos “Nascimentos” e “Mortes”. Sendo assim, a população é determinada pela diferença entre nascimentos e mortes somada a população inicial do período analisado. Já os fluxos, nascimentos e mortes, são determinados pelas variáveis auxiliares “Taxa de Natalidade” e “Taxa de Mortalidade”, respectivamente.

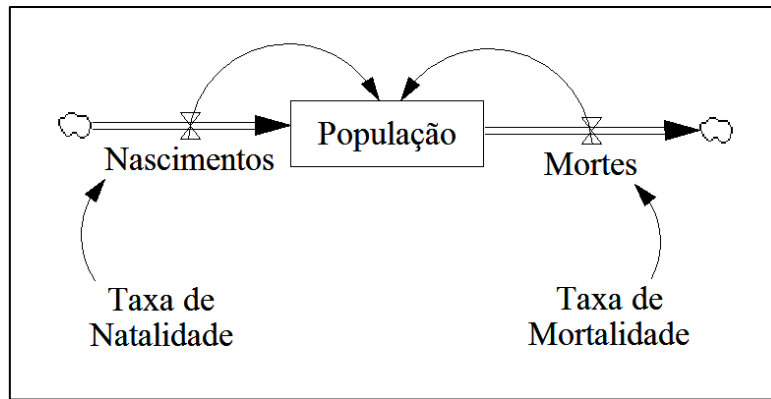


Figura 3.6 – DEF para a população
 Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2008, p. 85).

De modo geral, o DEF é empregado para classificar as variáveis do DCE e descrever os mecanismos de *feedback* por meio de equações diferenciais (Richmond, 2001). Para isso é necessário especificar a estrutura do modelo e as regras de decisão, estimar parâmetros, definir as condições iniciais e verificar a consistência do modelo com hipóteses dinâmicas (Sterman, 2000).

O DEF torna possível a simulação computacional do modelo proposto. Para isso, existem diversos aplicativos computacionais voltados para a simulação de modelos de DS, tais como o Stella, iThink, PowerSim e Vensim que permitem a análise e estudo de sistemas complexos (Chaerul *et al.*, 2008).

Os pacotes de *software* de DS oferecem duas opções de método de integração, o Euler e o Runge-Kutta, sendo o primeiro frequentemente utilizado como método padrão de simulação. O método Euler é comumente utilizado para simulação numérica devido a sua simplicidade e adequação para muitas aplicações. Além disso, os erros deste método são irrelevantes em modelos de sistemas sociais e humanos. Já o método de integração Runge-Kutta fornece alta precisão aos resultados do modelo, mas deve ser evitado em modelos com perturbações aleatórias (Sterman, 2000).

Antes de simular o modelo proposto é necessário verificar se o mesmo representa bem o sistema, produzindo resultados próximos a realidade. Sendo assim, existem diversos testes para os modelos de DS, os quais serão apresentados a seguir.

3.3 Testes dos Modelos em Dinâmica de Sistemas

Segundo Sterman (2000), o processo de validação de um modelo consiste em uma análise para verificar se o procedimento, objetivos e resultados do modelo são aceitáveis.

Para isso, são realizados testes para verificar as equações do modelo, avaliar o ajuste dos dados e as considerações dos modeladores.

Apesar de ser um aspecto importante, o processo de validação é controverso, pois é compreendido como a verificação da utilidade de um modelo em relação a algum propósito. Portanto, validar um modelo consiste em julgar também a validade de seu propósito, que é um processo qualitativo, informal e não-técnico (Barlas, 1996).

Vale ressaltar que a DS não busca a simulação exata de um sistema, mas, sim, a identificação de seus padrões do comportamento, proporcionando um melhor entendimento do mesmo e, conseqüentemente, auxiliando o processo de tomada de decisão (Richardson, 1991). Os modelos de DS são simplificações da realidade e, por isso, não podem ser tomados como verdades ou inverdades, apenas pode-se confirmar que são suficientes para o seu propósito (Coyle; Exelby, 2000).

Existem diversos testes específicos para identificar falhas e melhorar os modelos de DS. Esses testes ajudam a responder perguntas sobre o propósito e limite, sobre a estrutura física e de tomada de decisão e, também, sobre a análise de sensibilidade do modelo (Serman, 2000). Para Martis (2006), esses testes buscam identificar e quantificar o erro e a incerteza nos modelos conceituais e de simulação, quantificar o erro numérico da solução computacional, estimar a incerteza da simulação e comparar os resultados computacionais com os dados disponíveis.

Vale destacar que, os atuais *software* de simulação fornecem um suporte para a realização dos testes. Entre os aplicativos computacionais disponíveis, destaca-se o Vensim. De acordo com Malec (2017), esse *software* não apresenta limitações temáticas e, por isso, é comumente utilizado para simular qualquer sistema cujos elementos e as suas relações podem ser descritas por relações matemáticas. Além disso, o Vensim oferece um bom ambiente para a realização de testes de condições extremas, avaliação da estrutura, consistência dimensional e avaliação de parâmetros (Barlas, 1996). Já Oladokun e Aigbavboa (2018) destacam que o Vensim possui a capacidade ser vinculado a outros aplicativos computacionais (C, C++, Visual Basic, entre outros) e que os modelos de DS desenvolvidos em outros programas como, por exemplo, Powersim e Stella, podem ser facilmente convertidos para o Vensim.

Em uma linguagem mais operacional, o processo de validação do modelo consiste em uma sequência de testes no qual diferentes métodos são aplicados (Groesser; Schwaninger, 2012). Sendo assim, além de apresentar os principais testes e a suas

finalidades, o Quadro 3.1 expõe as principais ferramentas e métodos utilizados em cada um deles.

Vale ressaltar que alguns testes não são aplicáveis a todos os modelos e, por isso, não é possível determinar um plano genérico de teste para eles. Além de agrupar os testes em cinco categorias de modelagem (Mapeamento do Sistema, Modelagem Quantitativa, Teste de Hipóteses, Análise de Incertezas e Previsão e Otimização), Zagonel e Cobert (2006) classificam os testes em três categorias: Básico, Intermediário e Avançado. Deste modo, observa-se que para cada categoria de modelagem existe um conjunto de testes que são mais adequados. Além disso, a complexidade do teste também impacta na sua viabilidade de realização. A Tabela 3.1 apresenta a classificação dos testes apresentados no Quadro 3.1.

Tabela 3.1 – Categoria dos testes

Teste	Básico	Intermediário	Avançado	Categoria de modelagem adequada
Adequação da fronteira			✓	Modelagem Quantitativa
Avaliação da estrutura		✓		Mapeamento da Estrutura e Modelagem Quantitativa
Consistência dimensional	✓			Modelagem Quantitativa
Avaliação dos parâmetros		✓		Modelagem Quantitativa
Condições extremas		✓		Modelagem Quantitativa
Erro de integração	✓			Modelagem Quantitativa
Reprodução do comportamento		✓		Modelagem Quantitativa
Anomalia do comportamento			✓	Teste de Hipóteses
Membro da família			✓	Teste de Hipóteses
Comportamento inesperado		✓		Teste de Hipóteses
Análise de sensibilidade		✓		Teste de Hipóteses e Análise de Incertezas
Melhoria do sistema			✓	Previsão e Otimização

Fonte: Adaptado de Zagonel e Cobert (2006).

Quadro 3.1 – Testes para avaliação de modelos dinâmicos

Teste	Propósito do Teste	Ferramentas e Procedimentos
1. Adequação da fronteira	Verificar o comportamento do modelo quando o limite do mesmo é alterado.	Gráficos de limite do modelo, diagramas de subsistema, diagramas causais, mapas de estoque e fluxo e inspeção direta de equações de modelo.
2. Avaliação da estrutura	Verificar se o modelo está em conformidade com as leis básicas da física e se as regras de decisão capturam o comportamento adequado dos componentes do sistema.	Diagramas de estrutura de políticas, diagramas causais, mapas de estoque e fluxo e inspeção direta de equações de modelo. Verificar a racionalidade pretendida das regras de decisão.
3. Consistência dimensional	Verificar as unidades de medidas de todas as variáveis e parâmetros e a consistência dimensional de todas as equações.	<i>Software</i> de análise dimensional e inspeção das equações do modelo para os parâmetros suspeitos.
4. Avaliação dos parâmetros	Verificar se os parâmetros são consistentes e representam o mundo real.	Métodos estatísticos para estimar parâmetros e testes de modelo parciais para calibrar subsistemas.
5. Condições extremas	Verificar se o modelo responde de forma plausível quando submetido a políticas, choques e parâmetros extremos.	Testar valores extremos para cada entrada (isoladamente e em combinação). Simular situações de choques e condições extremas. Examinar a conformidade com as leis físicas.
6. Erro de integração	Verificar se os resultados são sensíveis à escolha do intervalo de tempo de simulação ou do método de integração numérica.	Verificar as alterações no comportamento quando o intervalo de tempo é reduzido à metade. Analisar o comportamento para diferentes métodos de integração.
7. Reprodução do comportamento	Verificar se o modelo reproduz o comportamento (qualitativo e quantitativo) de interesse no sistema (os sintomas de dificuldade que motivam o estudo).	Comparar resultados de modelos com dados, incluindo modos de comportamento, forma de variáveis, assimetrias, amplitudes relativas e eventos incomuns.
8. Anomalia do comportamento	Verificar se o modelo possui algum comportamento anômalo após alguma alteração.	Zerar alguma variável chave. Substituir suposições de equilíbrio com estruturas de desequilíbrio.
9. Membro de família	Verificar se o modelo reproduz o comportamento observado em outras instâncias no mesmo sistema.	Substituir suposições de equilíbrio com estruturas de desequilíbrio. Calibrar o modelo para a maior variedade possível de sistemas relacionados.
10. Comportamento inesperado	Verificar se o modelo gera um comportamento não observado ou não conhecido anteriormente.	Simular o modelo e reduzir todas as discrepâncias entre o comportamento do modelo e sua compreensão do sistema real.
11. Análise de sensibilidade	Verificar como o modelo se comporta com a incerteza de parâmetros, condições iniciais, diferentes políticas, limites do modelo e agregação.	Análise de sensibilidade univariada e multivariada. Aplicação de métodos analíticos (linearização, análise de estabilidade local e global, etc.).
12. Melhoria do sistema	Analisar se o processo de modelagem melhora o sistema.	Projetar experimentos com antecedência para avaliar o impacto do processo de modelagem em modelos mentais, comportamentos e resultados.

Fonte: Adaptado de Sterman (2000).

3.4 Aplicação da Dinâmica de Sistemas na Análise da Mobilidade Urbana

De acordo com Chen *et al.* (2006), o desenvolvimento da sustentabilidade urbana exige um equilíbrio entre fatores econômicos, sociais e ambientais. Entretanto, realizar decisões para melhorar a mobilidade urbana gera escolha (*trade-offs*) entre esses fatores (Litman, 2014). Por ser útil na análise dos problemas do setor de transporte, a DS vem sendo aplicada em diversos estudos para analisar a mobilidade urbana, conforme apresentado a seguir.

Acharya (2005) utiliza a abordagem da DS para avaliar diferentes alternativas de políticas que buscam conciliar o transporte motorizado com a mobilidade urbana sustentável nos países em desenvolvimento. Neste modelo, o transporte público é representado pelo serviço convencional de ônibus. Sendo assim, o autor analisa três cenários políticos: agressivo investimento rodoviário (em resposta ao congestionamento), desenvolvimento de vias de trânsito rápido no ano zero (implementação imediata da política) e desenvolvimento do trânsito rápido a partir do ano 20 (implementação tardia da política). Os resultados apontam a importância de o desenvolvimento do trânsito rápido aumentar o uso do transporte público e também para melhorar o congestionamento do tráfego rodoviário.

Buscando uma maior mobilidade e acessibilidade, Wirjodirdjo *et al.* (2014) estudaram, por meio da DS, o planejamento da revitalização do trem destinado ao transporte de passageiros em Surabaya, Indonésia. Este estudo buscou identificar um cenário em que esta revitalização proporcionasse um sistema de transporte sustentável. Sendo assim, foram analisados cinco cenários: (i) aumentar o número de estações ferroviárias; (ii) aumentar a capacidade do estacionamento na área da estação ferroviária; (iii) reativar e aumentar a faixa ferroviária; (iv) aumentar o número de horários de partida do trem; e (v) aumentar a taxa de utilização da estação ferroviária. Os autores concluem que aumentar o número de horários de partida apresenta resultados mais significativos do que os outros cenários.

Menezes *et al.* (2016) avaliaram os impactos da implementação de três políticas de mobilidade na cidade de São Paulo. Os autores analisaram as seguintes medidas: (i) redução da frequência e da distância das viagens motorizadas; (ii) melhoria do transporte público; e (iii) melhoria da eficiência de combustível dos transportes. Os resultados apontam que a medida de melhoria da eficiência de combustíveis apresenta um maior potencial para a redução das emissões de gases poluentes. Entretanto, conclui-se que as três medidas selecionadas apresentam benefícios sociais e econômicos complementares.

Para verificar a influência da política de estacionamentos na mobilidade urbana, Bernardino e Hoofd (2013) desenvolveram um modelo para analisar as mudanças geradas por essa política na divisão modal, na velocidade e no custo das viagens. Ao realizarem um estudo de caso na cidade de Lisboa, Portugal, foi identificado um aumento de 35% na velocidade dos deslocamentos e também um nível ótimo de oferta de estacionamentos. Por fim, os autores concluem que a precificação dos estacionamentos pode ser utilizada para se obter melhorias na mobilidade urbana.

Já Haghshenas *et al.* (2015) examinaram os impactos ambientais, econômicos e sociais de diversas políticas de transporte. O modelo de DS desenvolvido pelos autores apresenta a geração de viagens, a divisão modal, a oferta de transporte e o equilíbrio entre oferta e demanda de transporte como os principais módulos. Os autores realizaram um estudo de caso em Isfahan, Irã, e, utilizando cenários futuros, identificaram políticas eficazes. Além disso, o desenvolvimento de redes de transporte (incluindo metrô, trem e BRT) foi apontado como o melhor cenário sustentável, enquanto que a construção de estradas e estacionamentos foi apontado como o pior cenário.

De modo similar, Rassafi *et al.* (2014) desenvolveram um modelo por meio da DS para avaliar o sistema de transporte urbano, focando nas variáveis ambientais, econômicas e sociais. Para validar o modelo, os autores utilizaram dados reais da cidade de Mashhad, Irã. Os resultados mostram que as atuais políticas não são eficazes e a continuidade das mesmas resultarão no aumento de problemas e, conseqüentemente, em um sistema de transporte não sustentável.

Para analisar o impacto do crescimento populacional na demanda de transportes, Yao e Chen (2015) desenvolveram um modelo de simulação que explora as relações entre população, economia, habitação, transporte e o desenvolvimento do espaço urbano. Ao realizar um estudo de caso em Toronto, Canadá, os autores analisaram dois cenários: (i) aumentar a parcela do transporte público; e (ii) expandir a capacidade rodoviária. Como resultado, observa-se que o aumento do uso do transporte público em 30% resultaria em uma redução de 20% na distância percorrida por veículos até 2030, reduzindo assim o congestionamento. Já o aumento da capacidade rodoviária teria um resultado contrário, aumentando a distância percorrida por veículo e o congestionamento.

No contexto da gestão do congestionamento, destaca-se o trabalho de Jia *et al.* (2017). Este estudo apresenta um modelo para verificar os efeitos da política de cobrança de congestionamento e a política de subsídios em Xangai, China. Este modelo permite identificar um intervalo razoável de implementação das políticas para reduzir o número

de viagens por veículos privados, melhorar o nível de oferta do transporte público e, conseqüentemente, reduzir o congestionamento e a emissão de gases poluentes. A simulação mostrou que a combinação dessas duas políticas pode resultar em uma redução de 70,27% do grau de congestionamento e de 19,92% da quantidade de emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), enquanto que o nível da oferta do transporte público pode aumentar em aproximadamente 123,67%.

Já Liu *et al.* (2010) apresentam uma estrutura conceitual para descrever o comportamento do congestionamento e avaliar os efeitos de curto e longo prazo da política de precificação de congestionamento em um sistema socioeconômico de transporte. Além da população e a economia, os autores também consideram o turismo como um fator exógeno que afeta a demanda de transportes. O modelo desenvolvido permite analisar como as percepções dos usuários sobre o nível de serviço, o custo de deslocamento e o nível de congestionamento afetam a escolha dos viajantes em relação aos diferentes modos de transporte.

Por meio da DS e da econometria, Raux (2003) propõe uma estrutura de modelagem para simular os efeitos de médio e longo prazo das políticas de transporte urbano. Em um primeiro momento, o autor analisa os impactos da regulamentação do financiamento dos transportes públicos e a escassez dos fundos públicos. Posteriormente, é realizado uma análise da divisão modal baseada na modelagem preço-tempo. Além disso, o congestionamento também é analisado a partir da escolha do horário de partida. Por fim, é realizado um acoplamento das duas últimas análises descritas.

Li *et al.* (2013) apresentam um modelo para avaliar os impactos das políticas de priorização do transporte público dentro de um sistema de transporte. O modelo proposto possui o objetivo de auxiliar os formuladores de políticas a entender os impactos dessas políticas. O modelo é focado em políticas prioritárias, com o foco nos comportamentos de curto e longo prazos do sistema decorrentes dessas políticas.

Yang *et al.* (2014) avaliaram os efeitos do transporte ferroviário urbano em Regiões Metropolitanas sob os aspectos de tráfego, econômicos, sociais e ambientais. Para isso, foi realizado um estudo de caso na cidade Cantão, na China. Os autores utilizaram a escala de construção do sistema ferroviário como a variável de controle do modelo desenvolvido. Sendo assim, foram simulados cenários com diferentes graus de apoio do governo na construção do trânsito ferroviário urbano. Como resultado, os autores avaliam o grau de congestionamento, o número de veículos privados, o PIB, o uso do solo e os poluentes para cenário.

Sayyadi e Awasthi (2017) avaliam o impacto das políticas de planejamento de transporte sustentável. Utilizando dados hipotéticos, os autores analisam políticas relacionadas ao compartilhamento de viagens, à propriedade de carro e ao incentivo de viagens realizadas por transporte público. Os resultados apontam que as políticas de restrição a propriedade de carros têm mais influência do que as políticas de incentivo ao transporte público. Além disso, nota-se que as políticas de propriedade de carros diminuem a tendência de viagens por veículos privados e aumenta as viagens de transporte público. Por fim, observa-se que o compartilhamento de viagens é mais eficiente na redução do congestionamento, do consumo de combustível e das emissões do que as políticas de propriedade de carros.

Com o intuito de reduzir o consumo de energia e as emissões de carbono do tráfego urbano, encontra-se na literatura diversos estudos que aplicam a abordagem da DS para analisar os efeitos de políticas de transportes na emissão de poluentes. Neste contexto, Wen e Bai (2017), Hosseinabad e Moraga (2017), Liu *et al.* (2015), Liu *et al.* (2014), Azhaginiyal e Umadevi (2014), Vafa-Arani *et al.* (2014), Armah *et al.* (2010) e Chen *et al.* (2006) realizaram estudos de caso para analisar a influência dessas políticas. As principais políticas analisadas são: desenvolvimento do sistema de transporte público, melhoria na tecnologia nas indústrias de combustível e automotiva, restrições nos números de registro de veículos e gerenciamento da demanda de viagens. Apesar de determinadas políticas apresentarem diferentes desempenhos em cada estudo, todos os autores concluem que o melhor desempenho é obtido a partir de uma combinação de todas as políticas.

Diante do problema do crescimento da frota de veículos, Song *et al.* (2013) analisam os efeitos de diferentes políticas de transporte na propriedade de carros. Sendo assim, foi analisada a inibição do crescimento da propriedade de carros causada pelas seguintes políticas: restrições de compra, prioridade ao transporte público e uma política mais abrangente que considera várias políticas de transporte. Um estudo de caso realizado em Cantão, China, mostra que a política abrangente é mais eficiente no controle do crescimento da propriedade de carro. Entretanto, os autores mostram que as outras duas políticas apresentam benefícios no curto prazo.

Wang *et al.* (2008) também desenvolveram um modelo por meio da DS para analisar os impactos da política de propriedade de veículos no desenvolvimento do transporte urbano sustentável. Ao realizarem um estudo de caso na cidade de Dalian, China, os autores identificaram a necessidade de uma implementação mais rígida desta

política para restringir o número de veículos e, conseqüentemente, melhorar a sustentabilidade do sistema de transporte.

Baseado no trabalho de Wang *et al.* (2008), Fontoura *et al.* (2019) apresentam um modelo para analisar a influência da Política Nacional de Mobilidade Urbana no sistema de transporte urbano. O transporte coletivo, representado pelo serviço de ônibus, e as suas relações com o sistema de transporte urbano são inseridos neste modelo. Para verificar a aplicabilidade do modelo proposto, os autores realizam um estudo de caso na Região Metropolitana de São Paulo. Como resultado, observou-se a importância da implementação desta política para a redução de emissões de poluentes e do nível de congestionamento.

Após a análise dos modelos encontrados na literatura, nota-se que a maioria dos estudos abordam apenas um modo de transporte público. Além disso, o transporte não motorizado não é considerado em grande parte dos modelos que analisam a mobilidade urbana por meio da DS. Os fatores sociais e o uso do solo, apontados nas políticas de mobilidade urbana, também são geralmente desconsiderados nos modelos. Conforme já discutido, os problemas de mobilidade urbana são maiores em grandes centros urbanos, os quais possuem sistemas de transportes mais complexos. Deste modo, observa-se a necessidade de desenvolver um modelo mais complexo que envolva ao mesmo tempo diversos fatores relacionados a mobilidade urbana, permitindo assim uma análise mais realista dos sistemas de transportes.

3.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os conceitos e diagramas utilizados pelo método da DS. Além disso, foram apresentados os processos de modelagem e os testes para a validação dos modelos de DS. Por fim, foram apresentadas diferentes aplicações da abordagem da DS como uma ferramenta para auxiliar os formadores de políticas públicas. Deste modo, foi possível identificar lacunas existentes na literatura. Observa-se que grande parte dos estudos associam apenas a frota de ônibus como transporte público. Além disso, nota-se que o uso do solo, os fatores sociais e o incentivo do modo não motorizado estão ausentes na maioria dos estudos.

Baseado nos conceitos apresentados sobre o método da DS e nas lacunas identificadas na literatura, foi desenvolvido um modelo de DS para analisar os impactos da PNMU em sistemas socioeconômicos de transporte, o qual é apresentado a seguir.

4 MODELO PROPOSTO UTILIZANDO DINÂMICA DE SISTEMAS

Baseado na revisão dos modelos encontrados na literatura, estruturou-se um modelo de simulação em DS para analisar os impactos da PNMU em sistemas socioeconômicos de transportes. Os modelos de Wang *et al.* (2008) e Fontoura *et al.* (2019) foram as principais referências para a elaboração do modelo proposto.

Para torná-lo mais próximo da realidade, algumas variáveis e relações foram consideradas. Conforme discutido no Capítulo 3, a maior parte dos modelos de DS aplicados na análise mobilidade urbana consideram apenas o ônibus como transporte público. No modelo proposto, o transporte público é representado por ônibus, trem, metrô e o veículo leve sobre trilhos (VLT). Além de inserir o submodelo do transporte público com diferentes modos de transporte, o modelo proposto apresenta o incentivo ao transporte não motorizado em detrimento do transporte motorizado.

Vale ressaltar que, devido à complexidade do sistema de transportes e, conseqüentemente, o elevado número de variáveis envolvidas, o DCE proposto é composto por submodelos nos quais essas variáveis estão agrupadas. Deste modo, o DCE, apresentado na Figura 4.1, é composto por nove submodelos (População, Economia, Meio Ambiente, Demanda de Transportes, Oferta de Transportes, Transporte Não Motorizado, Transporte Público, Transporte Individual e Congestionamento) e a PNMU.

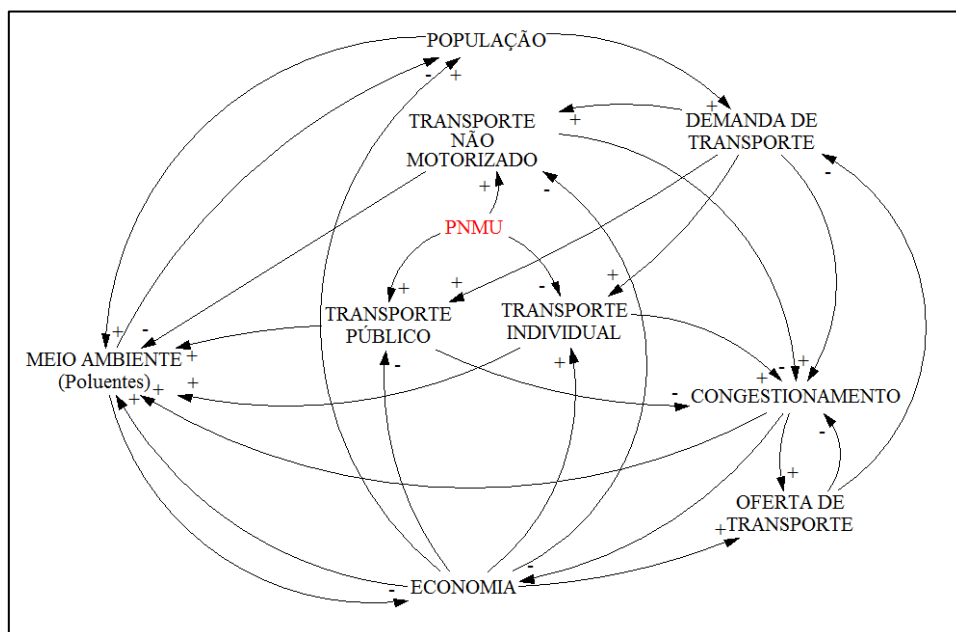


Figura 4.1 – Diagrama de Causa e Efeito proposto

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Wang *et al.* (2008) e Fontoura *et al.* (2019).

Para representar a influência da PNMU nos sistemas de transporte, o DCE apresentado possui diversos *loops*. Para um maior entendimento do modelo proposto, os principais *loops* são detalhados a seguir. Principais *loops*:

- i. População $\xrightarrow{+}$ Demanda de Transporte $\xrightarrow{+}$ Transporte Não Motorizado $\xrightarrow{-}$ Congestionamento $\xrightarrow{+}$ Meio ambiente (Poluentes) $\xrightarrow{-}$ Economia $\xrightarrow{+}$ População (positivo);
- ii. População $\xrightarrow{+}$ Demanda de Transporte $\xrightarrow{+}$ Transporte Coletivo $\xrightarrow{-}$ Congestionamento $\xrightarrow{+}$ Meio ambiente (Poluente) $\xrightarrow{-}$ Economia $\xrightarrow{+}$ População (positivo); e
- iii. População $\xrightarrow{+}$ Demanda de Transporte $\xrightarrow{+}$ Transporte Individual $\xrightarrow{+}$ Congestionamento $\xrightarrow{+}$ Meio ambiente (Poluentes) $\xrightarrow{-}$ Economia $\xrightarrow{+}$ População (negativo).

Um aumento no tamanho da população de uma determinada região eleva a demanda de transporte local (York *et al.*, 2017). Devido ao aumento da demanda, o número de viagens realizadas por todos os modos de transporte também aumenta (Pfaffenbichler *et al.*, 2010). Um maior número de viagens com o transporte não motorizado reduz o nível de congestionamento e, conseqüentemente, a emissão de poluentes provenientes do transporte urbano (Liu *et al.*, 2015; Wen *et al.*, 2017). Uma redução na emissão de poluentes gera um impacto positivo na economia, tornando a região mais atrativa, atraindo novos moradores para a região (Yang *et al.*, 2014; Jia *et al.*, 2017). Portanto, observa-se que o *loop* (i) descreve um comportamento positivo entre as variáveis, de modo que um aumento na primeira variável acarreta em um crescimento na mesma, gerando um crescimento exponencial ao longo do tempo. A diferença entre os três primeiros *loops* são os tipos de transporte. Como a PNMU incentiva o uso do transporte público em detrimento do transporte individual, tem-se que o aumento no número de viagens com transporte coletivo reduz o número de viagens com o transporte individual e, por isso, reduz o congestionamento. Assim como o transporte público, o transporte não motorizado apresenta uma relação proporcionalmente inversa com o congestionamento, pois o aumento no número de viagens com esse modo reduz o nível de congestionamento (Bedadala; Mallikarjuna, 2016). Deste modo, os *loops* (i) e (ii) são positivos. Entretanto, um aumento no número de viagens com veículos individual aumenta o nível de congestionamento (Jia *et al.*, 2017) e, por

isso, o terceiro *loop* é negativo, ou seja, é um ciclo de equilíbrio.

- iv. População $\xrightarrow{+}$ Demanda de Transporte $\xrightarrow{+}$ Transporte Não Motorizado $\xrightarrow{-}$ Meio ambiente (Poluentes) $\xrightarrow{-}$ Economia (positivo) $\xrightarrow{+}$ População (positivo);
- v. População $\xrightarrow{+}$ Demanda de Transporte $\xrightarrow{+}$ Transporte Público $\xrightarrow{-}$ Meio ambiente (Poluentes) $\xrightarrow{-}$ Economia $\xrightarrow{+}$ População (positivo); e
- vi. População $\xrightarrow{+}$ Demanda de Transporte $\xrightarrow{+}$ Transporte Individual $\xrightarrow{+}$ Meio ambiente (Poluentes) $\xrightarrow{-}$ Economia $\xrightarrow{+}$ População (negativo).

Os *loops* (iv), (v) e (vi) são similares aos *loops* (i) (ii) e (iii), porém não apresentam os submodelos Congestionamento e Economia. Desde modo, esses *loops* apresentam a relação direta entre os três tipos de transportes analisados com o submodelo Meio ambiente (Poluentes). Apesar desta mudança, os *loops* (iv), (v) e (vi) apresentam o mesmo comportamento dos *loops* (i) (ii) e (iii), respectivamente. Vale ressaltar que, assim como no *loop* (i), a relação do Transporte Público e o Meio Ambiente, apresentada no *loop* (v), considera que o aumento do transporte público é realizado em detrimento do transporte individual e, por isso, o aumento do número de viagens com esse modo reduz a emissão de poluentes.

- vii. População $\xrightarrow{+}$ Demanda de Transporte $\xrightarrow{+}$ Transporte Não Motorizado $\xrightarrow{-}$ Meio Ambiente (Poluentes) $\xrightarrow{-}$ População (positivo);
- viii. População $\xrightarrow{+}$ Demanda de Transporte $\xrightarrow{+}$ Transporte Público $\xrightarrow{-}$ Meio Ambiente (Poluentes) $\xrightarrow{-}$ População (positivo); e
- ix. População $\xrightarrow{+}$ Demanda de Transporte $\xrightarrow{+}$ Transporte Individual $\xrightarrow{+}$ Meio Ambiente $\xrightarrow{-}$ População (negativo).

Ao eliminar o submodelo Economia dos *loops* (iv), (v) e (vi), obtém-se os *loops* (vii), (viii) e (xi), respectivamente. Desde modo, esses *loops* apresentam a relação direta que existe entre o submodelo Meio ambiente (Poluentes) e a População. Apesar desta mudança, os *loops* comparados anteriormente apresentam os mesmos comportamentos.

- x. Economia $\xrightarrow{+}$ Oferta de Transporte $\xrightarrow{+}$ Congestionamento $\xrightarrow{+}$ Economia (positivo)

Um crescimento da economia faz com que exista um maior investimento na infraestrutura de transportes, aumentando a oferta e, conseqüentemente, reduzindo o congestionamento. Esta redução no nível de congestionamento impacta positivamente a economia local (Wang *et al.*, 2008), resultando em um ciclo de reforço (um aumento na variável inicial resulta em um aumento final na mesma variável).

- xi. Demanda de Transporte $\xrightarrow{+}$ Congestionamento $\xrightarrow{+}$ Oferta de Transporte $\xrightarrow{-}$ Demanda de Transporte (negativo)

Um aumento na demanda de viagens impacta diretamente no sistema de transporte, elevando o nível de congestionamento (Bernardino; Hoofd, 2013). Para corrigir esta situação são realizados investimentos para aumentar a oferta de transportes (Jia *et al.*, 2017) que acarretará e uma redução da demanda. Deste modo, observa-se que se trata de um ciclo de equilíbrio.

- xii. Congestionamento $\xrightarrow{+}$ Oferta de Transporte $\xrightarrow{-}$ Congestionamento (negativo)

O aumento da oferta de transporte resulta na redução do congestionamento (Jin; Rafferty, 2017). De maneira inversa, o aumento do congestionamento demanda por mais vias disponíveis, afetando a oferta de transporte (Fontoura *et al.*, 2019). Por fim, este é um ciclo de retroalimentação negativo.

- xiii. Economia $\xrightarrow{+}$ Transporte Individual $\xrightarrow{+}$ Meio Ambiente (Poluentes) $\xrightarrow{-}$ Economia (negativo);

- xiv. Economia $\xrightarrow{+}$ Transporte Público $\xrightarrow{-}$ Meio Ambiente (Poluentes) $\xrightarrow{-}$ Economia (positivo); e

- xv. Economia $\xrightarrow{+}$ Transporte Não Motorizado $\xrightarrow{+}$ Meio Ambiente (Poluentes) $\xrightarrow{-}$ Economia (positivo).

Na medida em que a economia cresce, aumenta o número de viagens realizadas por transporte individual (Sayyadi; Awasthi, 2017). Sendo assim, ocorre um aumento na emissão de gases poluentes (Rees *et al.*, 2016). Conforme já foi discutido, esse resultado tem um efeito negativo na economia. Portanto, observa-se que este *loop* é negativo. Diferente do transporte individual, o aumento da economia reduz o número de viagens com o transporte público e o transporte não motorizado e, por isso, os *loops* (xiv) e (xv) apresentam comportamento de

reforço.

- xvi. Economia $\xrightarrow{+}$ Transporte Individual $\xrightarrow{+}$ Congestionamento $\xrightarrow{+}$ Economia (positivo);
- xvii. Economia $\xrightarrow{+}$ Transporte Público $\xrightarrow{+}$ Congestionamento $\xrightarrow{+}$ Economia (positivo); e
- xviii. Economia $\xrightarrow{+}$ Transporte Não Motorizado $\xrightarrow{+}$ Congestionamento $\xrightarrow{+}$ Economia (positivo).

Os *loops* (xvi), (xvii) e (xviii) se diferenciam dos *loops* (xiii) (xiv) e (xv), respectivamente, devido a substituição do submodelo Meio ambiente pelo submodelo Congestionamento. Conforme apresentado, o transporte individual e o congestionamento apresentam uma relação diretamente proporcional, ou seja, o aumento do primeiro acarreta no crescimento do segundo. De maneira inversa, o aumento do uso do transporte público e não motorizado reduz o congestionamento. Portanto, o *loop* (x) é positivo e os *loops* (xi) e (xii) são negativos.

Vale ressaltar que não foram detalhados todos os *loops* devido a quantidade de relações. Entretanto, as relações apresentadas anteriormente são as mais importantes e as que possuem a maior quantidade de submodelos envolvidos. Além dos *loops*, é importante ressaltar no DCE o incentivo da PNMU nos diferentes tipos de transporte. Assim como os modelos de Li *et al.* (2013) e Fontoura *et al.* (2019), a política incentiva o transporte público em detrimento do transporte individual. Além disso, o DCE apresenta o incentivo da PNMU ao transporte não motorizado.

Apesar de apresentar as relações entre os submodelos, o DCE não apresenta todas as variáveis e nem as classificam de acordo com o seu tipo. Portanto, para a realização do DEF, todas as variáveis do modelo foram listadas, classificadas e são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Variáveis do modelo proposto

Tipo	Variável
Estoque	População
	PIB
	Emissão Total de CO2
	Quilometragem total de trilhos (Trem)
	Quilometragem total de trilhos (Metrô)
	Quilometragem total de trilhos (VLT)
	Quilometragem total de vias urbanas
Área Urbana	
Fluxo	Aumento líquido da população
	Acréscimos de CO2
	Aumento do PIB
	Acréscimo da quilometragem de trilhos (Trem)
	Acréscimo da quilometragem de trilhos (Metrô)
	Acréscimo da quilometragem de trilhos (VLT)
	Acréscimo da quilometragem de vias urbanas
Aumento da Área Urbana	
Auxiliar	Taxa de crescimento da População
	Taxa média de viagem
	Total de Viagens
	Viagens com modo não motorizado
	Viagens com modo motorizado
	PNMU
	Atratividade do Modo não Motorizado
	Atratividade do Transporte Público
	Viagens com Transporte Individual
	Viagens com Transporte Coletivo
	Viagens com Ônibus
	Viagens com Trem
	Viagens com Metrô
	Viagens com VLT
	Investimento em infraestrutura de transportes
	Investimento em infraestrutura de transportes em relação ao PIB
	Solicitação do aumento
	Aumento do Investimento em infraestrutura de transporte devido o congestionamento
	Percentual do PIB
	Taxa de crescimento do PIB
	Quilômetro de trilhos (VLT) solicitados
	Quilômetro de trilhos (Trem) solicitados
	Quilômetro de trilhos (Metrô) solicitados
Quilômetro de vias solicitados	
Preço do Km de trilho (VLT)	
Preço do Km de trilho (Trem)	
Preço do Km de trilho (Metrô)	

Tabela 4.1 – Variáveis do modelo proposto

Tipo	Variável
Auxiliar	Preço do Km de Vias
	Congestionamento
	Distância total percorrida por Veíc. Coletivo
	Distância total percorrida por Veíc. Individual
	Capacidade do Sistema
	Distância percorrida por Km de via
	Distância média por viagem (Ônibus)
	Distância média por viagem (Veíc. Individual)
	Emissões do Transporte Individual
	Emissões do Transporte Público
	Emissões de CO2 (Ônibus)
	Emissões de CO2 (Metrô)
	Emissões de CO2 (VLT)
	Emissões de CO2 (Trem)
	Kg de CO2 por passageiro-Km (Veíc. Individual)
	Kg de CO2 por passageiro-Km (Ônibus)
	Kg de CO2 por passageiro-Km (Trem)
	Kg de CO2 por passageiro-Km (Metrô)
	Kg de CO2 por passageiro-Km (VLT)
	Distância média da viagem (Trem)
	Distância média da viagem (Metrô)
	Distância média da viagem (VLT)
	Rede de transporte de média e alta capacidade
RTR	
Área Coberta	
Taxa de desenvolvimento urbano	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base na análise do DCE apresentado e na classificação das variáveis, foi desenvolvido o DEF que é apresentado na Figura 4.2. Os submodelos População, Economia, Demanda de Transporte, Oferta de Transporte, Transporte Público, Congestionamento e Meio Ambiente são descritos nas subseções a seguir.

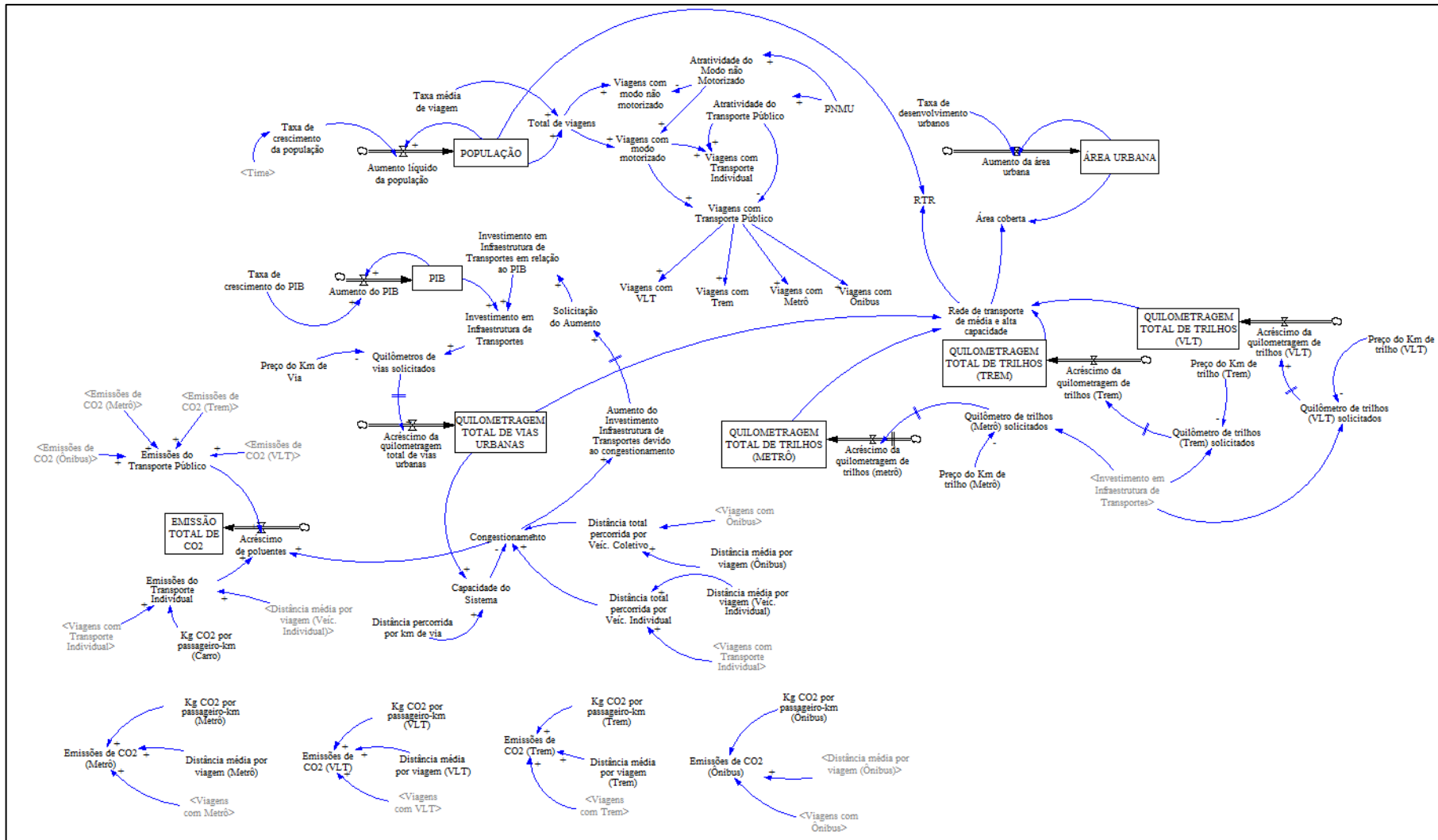


Figura 4.2 – Diagrama de Estoque e Fluxo proposto
 Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 Submodelo População

No modelo proposto, o submodelo População, apresentado na Figura 4.3, retrata o estágio de desenvolvimento de uma determinada região (Wang *et al.*, 2008). Deste modo, a população (Equação 4.1) é selecionada como variável de nível, o aumento líquido da população (Equação 4.2) como variável de taxa e a taxa de crescimento da população como variável auxiliar.

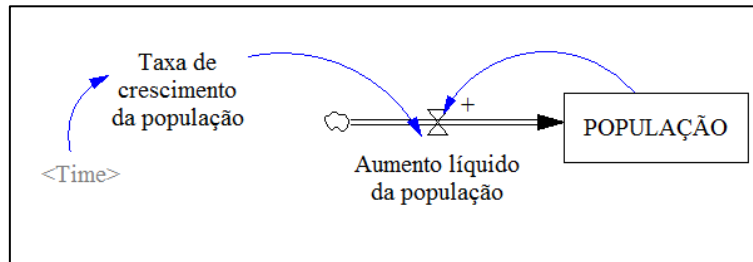


Figura 4.3 – Submodelo População

Fonte: Elaborado pelo autor.

$$População = \int_{t_0}^t (Aumento\ líquido\ da\ população) dt + População(t_0) \quad (4.1)$$

$$Aumento\ líquido\ da\ população = População \times Taxa\ de\ Crescimento\ da\ População \quad (4.2)$$

4.2 Submodelo Economia

Para avaliar o impacto da economia nos sistemas de transportes, o PIB é a variável de estoque do submodelo, como pode ser visto na Figura 4.4, e é calculado conforme a Equação (4.3).

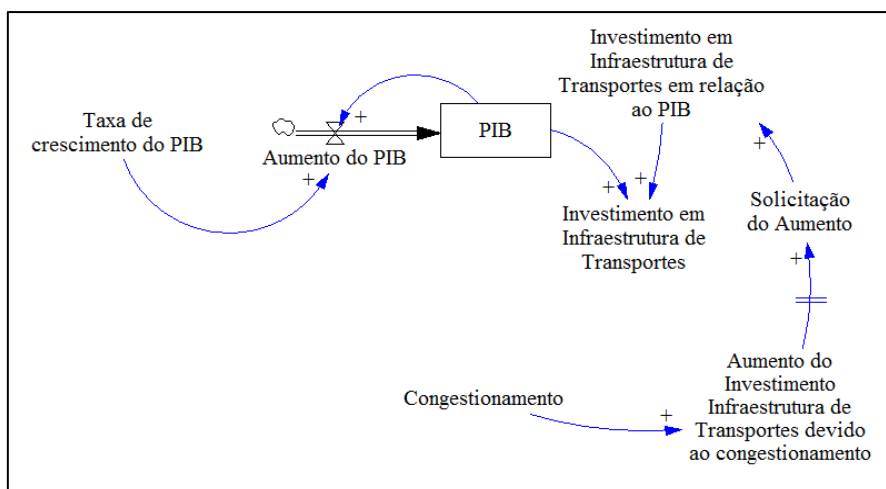


Figura 4.4 – Submodelo Economia

Fonte: Elaborado pelo autor.

$$PIB = \int_{t_0}^t (\text{Aumento do PIB})dt + PIB(t_0) \quad (4.3)$$

Onde:

$$\text{Aumento do PIB} = PIB \times \text{Taxa de crescimento do PIB} \quad (4.4)$$

O aumento ou decréscimo na economia impacta diretamente nos investimentos realizados no setor de transporte. Por ser influenciado pelo PIB, o investimento em transporte é determinado conforme a Equação (4.5).

$$\begin{aligned} & \text{Investimento em infraestrutura de Transportes} \\ & = PIB \\ & \times \text{Investimento em infraestrutura de transportes em relação ao PIB} \end{aligned} \quad (4.5)$$

A variável “Investimento em Infraestrutura de Transportes em relação ao PIB”, apresentada na Equação (4.6), corresponde ao percentual do PIB local que é destinado a manutenção e ampliação da infraestrutura de transportes. Entretanto, no modelo proposto, esta variável é influenciada pela variável congestionamento. Sendo assim, se o sistema analisado apresenta um nível elevado de congestionamento, ocorre um aumento do investimento em transportes para solucionar essa externalidade negativa. Como a versão gratuita do *software* Vensim® PLE não permite chamar o retorno de uma função dentro de outra função, foram criadas duas variáveis para representar esta relação.

A variável “Aumento do Investimento em Infraestrutura de Transportes devido ao Congestionamento” verifica se existe congestionamento no sistema. Caso o sistema apresente congestionamento, o aumento do investimento corresponderá a um percentual da taxa normalmente destinada ao transporte que é representado pelo parâmetro *A* na Equação (4.8). Em caso negativo, o aumento é igual a 0. Como o aumento no investimento não ocorre de maneira instantânea, a variável “Solicitação do aumento” consiste no *delay* (atraso) entre o período que o congestionamento foi identificado até o momento em que o aumento do investimento em transporte realmente ocorre. Esse *delay* é representado pelo parâmetro *B* na Equação (4.7).

$$\begin{aligned} & \text{Investimento em infraestrutura de transportes em relação do PIB} \\ & = \text{Percentual do PIB} + \text{Solicitação do aumento} \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\text{Solicitação do aumento} = \text{DELAY FIXED} (\text{Aumento do Investimento em infraestrutura de Transportes devido ao Congestionamento}, B, 0) \quad (4.7)$$

$$\text{Aumento do Investimento em Infraestrutura de Transportes devido ao Congestionamento} = \text{IF THEN ELSE} (\text{Congestionamento} > 1, \text{Percentual do PIB} \times A, 0) \quad (4.8)$$

Vale ressaltar que a condição $\text{Congestionamento} > 1$ utilizada na Equação (4.8) busca identificar se o sistema apresenta congestionamento. Sobre este parâmetro, maiores explicações são apresentadas na Seção 4.6.

4.3 Submodelo Demanda de Transporte

Conforme apresentado na Figura 4.5, a demanda de transporte é definida pelo tamanho da população e a taxa média de viagem por pessoa e, por isso, quanto maior forem essas duas variáveis, maior será o número de viagens. Deste modo, o total de viagens realizadas é definido pela Equação 4.9.

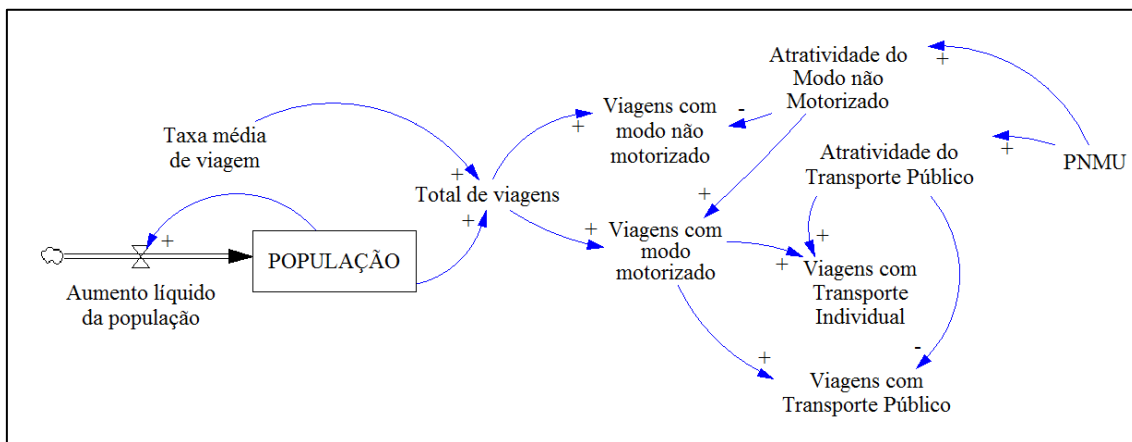


Figura 4.5 – Submodelo Demanda de Transporte

Fonte: Elaborado pelo autor.

$$\text{Total de Viagens} = \text{População} \times \text{Taxa média de viagens} \quad (4.9)$$

A partir do número total de viagens é possível determinar a quantidade de viagens realizadas com modos motorizados e não motorizados. Para isso, utiliza-se a atratividade do modo não motorizado. Dessa maneira, tem-se que o número de viagens com modo não motorizado e a quantidade de viagens com modo motorizado são definidos pelas Equações 4.10 e 4.11, respectivamente.

$$\begin{aligned}
 & \textit{Viagens com Modo não Motorizado} \\
 & = \textit{Total de viagens} \quad (4.10) \\
 & \times \textit{Atratividade do Modo não Motorizado}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \textit{Viagens com Modo Motorizado} \\
 & = \textit{Total de viagens} \quad (4.11) \\
 & \times (1 - \textit{Atratividade do Modo não Motorizado})
 \end{aligned}$$

Com a quantidade de viagens com o modo motorizado definida, é possível determinar a quantidade de viagens que são realizadas com o transporte público e com o transporte individual. Para isso utiliza-se a atratividade do transporte público. Com isso, tem-se que o número de viagens com transporte público e com transporte individual são definidas de acordo com as Equações 4.12 e 4.13, respectivamente.

$$\begin{aligned}
 & \textit{Viagens com Transporte Público} \\
 & = \textit{Viagens com Modo Motorizado} \quad (4.12) \\
 & \times \textit{Atratividade do Transporte Público}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \textit{Viagens com Transporte Individual} \\
 & = \textit{Viagens com Modo Motorizado} \quad (4.13) \\
 & \times (1 - \textit{Atratividade do Transporte Público})
 \end{aligned}$$

Vale ressaltar que, de acordo com o modelo proposto, a atratividade do modo não motorizado e a atratividade do transporte público são influenciadas pela PNMU. Assim, as duas atratividades devem ser determinadas em função desta variável, a qual é modelada por meio da função “RAMP”. Esta função altera suavemente o valor de uma variável como uma curva e o seu uso é comum em situações onde é necessário simular um fluxo linearmente, crescente ou decrescente, que não é constante ao longo do tempo (Abidin *et al.*, 2014). A função RAMP atribui zero para a variável até o início da alteração do seu comportamento. Após esse período, a curva aumenta o valor dessa variável até atingir um valor determinado e, em seguida, permanece constante. Usando essa função, é possível simular o período de adaptação de políticas (Coyle, 1996). Sendo assim, essa função tem um comportamento semelhante à variável PNMU, pois existe um prazo para o cumprimento desta política, que será gradualmente implementada até atingir o objetivo. A estrutura dessa função é apresentada na Equação (4.14).

Como pode ser visto pela Equação (4.17), o número de quilômetros de vias solicitados é determinado pela razão entre os investimentos destinados ao transporte e o preço médio do Km de via. Vale ressaltar que para representar o percentual de investimento em infraestrutura de transportes destinado a expansão da rede viária utilizou-se o parâmetro D .

$$\text{Quilômetros de vias solicitados} = \frac{D \times \text{Investimento em Transporte}}{\text{Preço do Km de via}} \quad (4.17)$$

De maneira análoga as vias urbanas, foram determinadas equações para representar o aumento da oferta de transporte sobre trilhos. Os períodos para implantação de novos trilhos de trem, metrô e VLT são representados pelos parâmetros E, G e I , respectivamente. Para representar o percentual do investimento em infraestrutura de transportes destinado a expansão das linhas de trem, de metrô e de VLT utilizou-se os parâmetros F, H e J , respectivamente. Sendo assim, as Equações (4.18), (4.21) e (4.24) representam a quilometragem total de trilhos de trem, metrô e VLT, respectivamente.

$$\begin{aligned} & \text{Quilometragem total de trilhos (Trem)} \\ & = \int_{t_0}^t (\text{Acréscimo da quilometragem de trilhos (Trem)}) dt \quad (4.18) \\ & + \text{Quilometragem total de trilhos (Trem)}(t_0) \end{aligned}$$

Onde:

$$\begin{aligned} & \text{Acréscimo da quilometragem de trilhos (Trem)} \quad (4.19) \\ & = \text{DELAY FIXED}(\text{Quilômetros de trilhos (Trem) solicitados}, E, 0) \end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned} & \text{Quilômetros de trilhos (Trem) solicitados} \\ & = \frac{F \times \text{Investimento em Transporte}}{\text{Preço do Km de trilho (Trem)}} \quad (4.20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Quilometragem total de trilhos (Metr\^o)} \\
& = \int_{t_0}^t (\text{Acr\^escimo da quilometragem de trilhos (Metr\^o)}) dt \quad (4.21) \\
& + \text{Quilometragem total de trilhos (Metr\^o)}(t_0)
\end{aligned}$$

Onde:

$$\begin{aligned}
& \text{Acr\^escimo da quilometragem de trilhos (Metr\^o)} \quad (4.22) \\
& = \text{DELAY FIXED}(\text{Quil\^ometros de trilhos (Metr\^o) solicitados}, G, 0)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{e} \\
& \text{Quil\^ometros de vias solicitados} = \frac{H \times \text{Investimento em Transporte}}{\text{Pre\^co do Km de trilho (Metr\^o)}} \quad (4.23)
\end{aligned}$$

Quilometragem total de trilhos (VLT)

$$\begin{aligned}
& = \int_{t_0}^t (\text{Acr\^escimo da quilometragem de trilhos (VLT)}) dt \quad (4.24) \\
& + \text{Quilometragem total de trilhos (VLT)}(t_0)
\end{aligned}$$

Onde:

$$\begin{aligned}
& \text{Acr\^escimo da quilometragem de trilhos (VLT)} \quad (4.25) \\
& = \text{DELAY FIXED}(\text{Quil\^ometros de trilhos (VLT) solicitados}, I, 0)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{e} \\
& \text{Quil\^ometros de vias solicitados} = \frac{J \times \text{Investimento em Transporte}}{\text{Pre\^co do Km de trilho (VLT)}} \quad (4.26)
\end{aligned}$$

A partir da oferta de transporte s\~ao calculados dois indicadores de mobilidade urbana: o *Rapid Transit to Resident* (RTR) e a \u00c1rea Coberta. Para o c\u00e1lculo desses dois indicadores, \u00e9 necess\u00e1rio determinar a extens\u00e3o total da infraestrutura de transporte de m\u00e9dia e alta capacidade, como pode ser visto na Equa\u00e7\u00e3o (4.27).

$$\begin{aligned}
& \text{Rede de transporte de média e alta capacidade} \\
& = \text{Quilometragem total de trilhos (Trem)} \\
& + \text{Quilometragem total de trilhos (Metrô)} \\
& + \text{Quilometragem total de trilhos (VLT)} \\
& + x \times \text{Quilometragem total de vias urbanas}
\end{aligned} \tag{4.27}$$

Onde x representa a porcentagem da quilometragem total de vias urbanas destinadas a transporte de média e alta capacidade.

De acordo com a Equação (4.28), o RTR é expresso em quilômetros de transporte de média e alta capacidade por milhão de habitantes. Adaptado do modelo de Sayyadi e Awasthi (2017), a variável “Área Coberta” consiste na quilometragem de transporte de média e alta capacidade por quilômetro quadrado, como pode ser visto na Equação (4.29).

$$RTR = \frac{\text{Rede de transporte de média e alta capacidade}}{\left(\frac{\text{População}}{1.000.000}\right)} \tag{4.28}$$

$$\text{Área Coberta} = \frac{\text{Rede de transporte de média e alta capacidade}}{\text{Área Urbana}} \tag{4.29}$$

Por fim, a variável “Área Urbana”, utilizada no cálculo do indicador “Área Coberta”, é determinada pelas Equações (4.30) e (4.31).

$$\text{Área Urbana} = \int_{t_0}^t (\text{Aumento da Área Urbana}) dt + \text{Área Urbana}(t_0) \tag{4.30}$$

Onde:

$$\begin{aligned}
& \text{Aumento da Área Urbana} \\
& = \text{Área Urbana} \times \text{Taxa de desenvolvimento urbano}
\end{aligned} \tag{4.31}$$

4.5 Submodelo Transporte Público

O submodelo Transporte Público, apresentado na Figura 4.7, consiste em realizar a divisão modal após a determinação do número de viagens realizadas por este tipo de transporte. Sendo assim, como pode ser visto nas Equações (4.32), (4.33), (4.34) e (4.35), o número de viagens com ônibus, metrô, trem e VLT representa a participação de cada modo vezes a quantidade de viagens. Para isso, utilizou-se os parâmetros K , L , M e N que

representam a porcentagem do número de viagens realizadas por ônibus, metrô, trem e VLT, respectivamente.

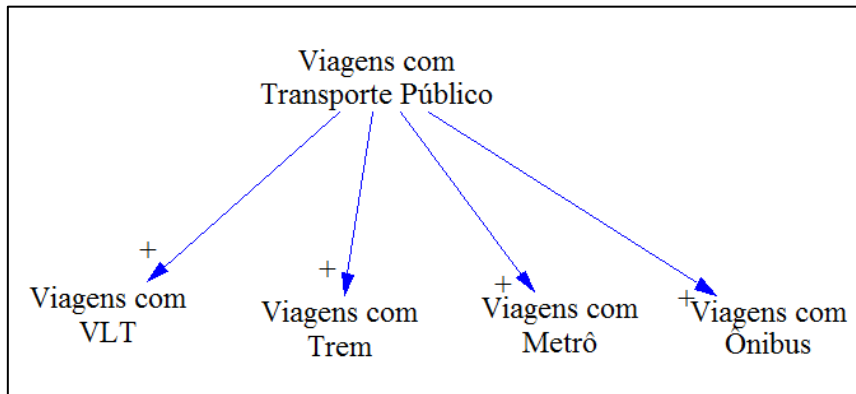


Figura 4.7 – Submodelo Transporte Público
Fonte: Elaborado pelo autor.

$$Viagens\ com\ \hat{O}nibus = K \times Viagens\ com\ Transporte\ P\acute{u}blico \quad (4.32)$$

$$Viagens\ com\ Trem = L \times Viagens\ com\ Transporte\ P\acute{u}blico \quad (4.33)$$

$$Viagens\ com\ Metr\hat{o} = M \times Viagens\ com\ Transporte\ P\acute{u}blico \quad (4.34)$$

$$Viagens\ com\ VLT = N \times Viagens\ com\ Transporte\ P\acute{u}blico \quad (4.35)$$

4.6 Submodelo Congestionamento

Com base nos modelos propostos por Wang *et al.* (2008) e Sayyadi e Awasthi (2017), o congestionamento pode ser determinado a partir da capacidade das vias e da distância percorrida pelos veículos. Como pode ser visto na Equação (4.36), o congestionamento é definido a partir da distância total percorrida (DTP) por veículos (privados e coletivos) e a capacidade do sistema. Sendo assim, a variável congestionamento é adimensional e representa o quanto o sistema está sendo utilizado. Em outras palavras, se esta variável assumir valores acima de 1,00 significa que a distância total percorrida pela população é maior que a capacidade do sistema. Assim, adotou-se na Equação (4.9) que um sistema de transporte apresenta congestionamento quando esta variável assume valores superiores a 1,00. A seguir, a Figura 4.8 apresenta o Submodelo Congestionamento.

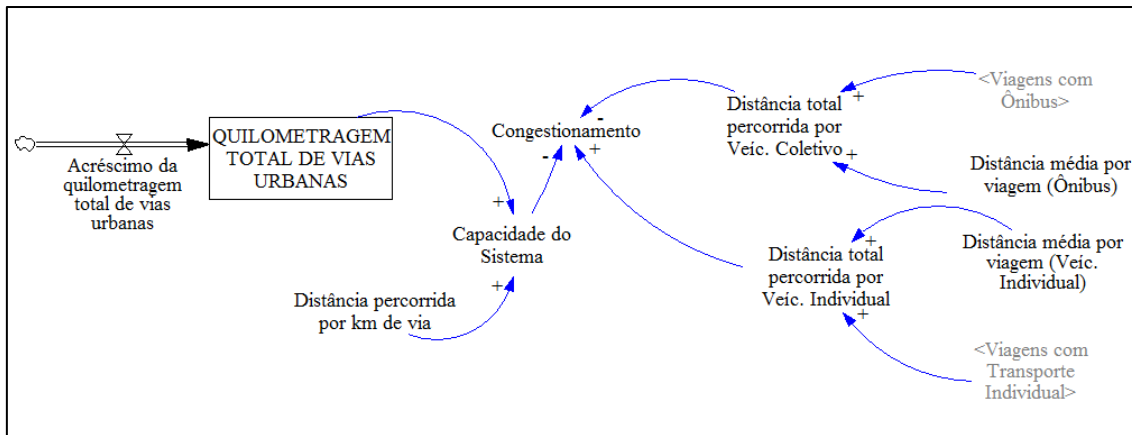


Figura 4.8 – Submodelo Congestionamento

Fonte: Elaborado pelo autor.

Congestionamento

$$= \frac{(DTP \text{ por Veíc. Coletivo} + DTP \text{ por Veíc. Individual})}{Capacidade \text{ do Sistema}} \quad (4.36)$$

As distâncias totais percorridas, tanto pelo transporte público quanto pelo transporte individual, são determinadas pela quantidade de viagens vezes a distância média por viagem. Entretanto, o número total de viagens com transporte público e o número de viagens com transporte individual representam a demanda de viagens da população em um ano. Portanto, deve-se considerar as taxas médias de ocupação de ônibus e de veículos individuais. Essas taxas são representadas nas Equações (4.37) e (4.38) pelos parâmetros O e P , respectivamente.

$$Distância \text{ total percorrida por Veíc. Coletivo} = \frac{Viagens \text{ com } \hat{o}nibus}{O} \times Distância \text{ média por viagem } (\hat{O}nibus) \quad (4.37)$$

$$Distância \text{ total percorrida por Veíc. Individual} = \frac{Viagens \text{ com Transporte Individual}}{P} \times Distância \text{ média por viagem } (Veic. Individual) \quad (4.38)$$

Se a simulação do modelo for feita entre períodos de um ano, os valores das distâncias totais percorridas por veículos coletivos e individuais representarão o somatório anual. Neste caso, deve-se multiplicar a capacidade das vias por 365 de modo

Emissão Total de CO₂

$$= \int_{t_0}^t (\text{Acréscimo de CO}_2) dt + \text{Emissão Total de CO}_2(t_0) \quad (4.40)$$

O submodelo Meio Ambiente é influenciado por outros submodelos como, por exemplo, o submodelo Congestionamento. De acordo com Resende e Sousa (2009), o congestionamento aumenta em média 20% a emissão de poluentes. Sendo assim, a variável acréscimo de poluente é determinada conforme a Equação (4.41).

$$\begin{aligned} \text{Acréscimo de Poluente} = & \text{IF THEN ELSE (Congestionamento} > 1, 1,2 \times \\ & (\text{Emissões do Transporte Público} + \text{Emissões do Transporte Individual}), \\ & \text{Emissões do Transporte Público} + \text{Emissões do Transporte Individual}) \end{aligned} \quad (4.41)$$

De acordo com as Equações (4.42) e (4.43), as emissões do transporte público resultam do somatório das emissões provenientes de todos os modos de transporte público, enquanto que as emissões do transporte individual correspondem as emissões geradas por veículos privados. Os cálculos para determinar as emissões provenientes de cada modo do transporte público são apresentadas nas Equações (4.44), (4.45), (4.46), e (4.47).

Emissões do Transporte Público

$$\begin{aligned} = & \text{Emissões de CO}_2(\hat{\text{Ônibus}}) + \text{Emissões de CO}_2(\text{Trem}) \\ & + \text{Emissões de CO}_2(\text{Metrô}) + \text{Emissões de CO}_2(\text{VLT}) \end{aligned} \quad (4.42)$$

Emissões do Transporte Individual

$$\begin{aligned} = & \text{Viagens com Transporte Individual} \\ & \times \text{Kg de CO}_2 \text{ por passageiro} \\ & - \text{Km (Carro)} \\ & \times \text{Distância média por viagem (Veíc. Individual)} \end{aligned} \quad (4.43)$$

Emissões de CO₂(Ônibus)

$$\begin{aligned} = & \text{Viagens com } \hat{\text{Ônibus}} \times \text{Kg de CO}_2 \text{ por passageiro} \\ & - \text{Km } (\hat{\text{Ônibus}}) \times \text{Distância média por viagem } (\hat{\text{Ônibus}}) \end{aligned} \quad (4.44)$$

$$\begin{aligned}
& \text{Emissões do } CO_2 \text{ (Trem)} \\
& = \text{Viagens com Trem} \times \text{Kg de } CO_2 \text{ por passageiro} \quad (4.45) \\
& - \text{Km (Trem)} \times \text{Distância média por viagem (Trem)}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Emissões de } CO_2 \text{ (Metrô)} \\
& = \text{Viagens com Metrô} \times \text{Kg de } CO_2 \text{ por passageiro} \quad (4.46) \\
& - \text{Km (Metrô)} \times \text{Distância média por viagem (Metrô)}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Emissões do } CO_2 \text{ (VLT)} \\
& = \text{Viagens com Trem} \times \text{Kg de } CO_2 \text{ por passageiro} \quad (4.47) \\
& - \text{Km (VLT)} \times \text{Distância média por viagem (VLT)}
\end{aligned}$$

4.8 Unidades de Medida

Conforme apresentado na Figura 4.1, o DCE proposto apresenta a relação dos nove submodelos e a PMNU. Esses submodelos foram detalhados nas Subseções (4.1) – (4.7), inclusive com todos os equacionamentos necessários.

Vale ressaltar que as variáveis dos submodelos Transporte Individual e Transporte Não Motorizado, exibidos na Figura 4.1, estão presentes na definição de variáveis de outros submodelos como, por exemplo, o submodelo Demanda de Transporte. De maneira análoga, a PMNU, também apresentada na Figura 4.1, está presente no submodelo Demanda de Transporte, impactando indiretamente em todos os outros submodelos.

Após o detalhamento do modelo proposto, a Tabela 4.2 apresenta o equacionamento matemático e a unidade de medida de todas as variáveis que serão utilizadas posteriormente na validação e na simulação do modelo proposto. Vale ressaltar que os aplicativos computacionais de DS utilizam automaticamente a função integral nas equações das variáveis de estoque.

Tabela 4.2 – Equacionamento e unidades de medida das variáveis

Tipo	Variável	Equação	Unidade
Estoque	População	Aumento líquido da população + População(t_0)	Habitante
	PIB	Aumento do PIB + PIB(t_0)	R\$
	Emissão Total de CO ₂	Acréscimo de CO ₂ + Emissão Total de CO ₂ (t_0)	Kg de CO ₂
	Quilometragem total de trilhos (Trem)	Acréscimo da quilometragem de trilhos (Trem) + Quilometragem total de trilhos (Trem)(t_0)	Km
	Quilometragem total de trilhos (Metrô)	Acréscimo da quilometragem de trilhos (Metrô) + Quilometragem total de trilhos (Metrô)(t_0)	Km
	Quilometragem total de trilhos (VLT)	Acréscimo da quilometragem de trilhos (VLT) + Quilometragem total de trilhos (VLT)(t_0)	Km
	Quilometragem total de vias urbanas	Acréscimo da quilometragem de vias urbanas + Quilometragem total de vias urbanas(t_0)	Km
	Área Urbana	Aumento da área urbana + Área urbana(t_0)	Km ²
Fluxo	Aumento líquido da população	População × Taxa de Crescimento	Habitante
	Acréscimos de CO ₂	Acréscimo de poluentes = IF THE ELSE (Congestionamento > 1, 1.2 × (Emissões do Transporte Público + Emissões do Transporte Individual), Emissões do Transporte Público + Emissões do Transporte Individual	Kg de CO ₂
	Aumento do PIB	PIB × Taxa de crescimento do PIB	R\$
	Acréscimo da quilometragem de trilhos (Trem)	DELAY FIXED (Quilômetro de trilhos (Trem) solicitados, E, 0)	Km
	Acréscimo da quilometragem de trilhos (Metrô)	DELAY FIXED (Quilômetro de trilhos (Metrô) solicitados, G, 0)	Km
	Acréscimo da quilometragem de trilhos (VLT)	DELAY (Quilômetro de trilhos (VLT) solicitados, I, 0)	Km
	Acréscimo da quilometragem de vias urbanas	DELAY FIXED (Quilômetros de vias solicitados, C, 0)	Km
	Aumento da Área Urbana	Área Urbana × Taxa de desenvolvimento urbano	Km ²
Auxiliar	Total de Viagens	População × Taxa média de viagens	Viagem
	Viagens com modo não motorizado	Total de viagens × (Atratividade do Modo não Motorizado)	Viagem
	Viagens com modo motorizado	Total de viagens × (1 - Atratividade do Modo não Motorizado)	Viagem
	Viagens com Transporte Individual	Viagens com modo motorizado × (1 - Atratividade do Transporte Público)	Viagem
	Viagens com Transporte Coletivo	Viagens com modo motorizado × Atratividade do Transporte Público	Viagem
	Viagens com Ônibus	K × Viagens com Transporte Público	Viagem
	Viagens com Trem	L × Viagens com Transporte Público	Viagem
	Viagens com Metrô	M × Viagens com Transporte Público	Viagem
	Viagens com VLT	N × Viagens com Transporte Público	Viagem
	Investimento em transporte	PIB × Investimento em Transporte em relação ao PIB	R\$
	Investimento em transporte em relação ao PIB	Percentual do PIB + Solicitação do aumento	Percentual
	Solicitação do aumento	DELAY FIXED (Aumento do Investimento em Transporte devido o Congestionamento, B, 0)	Percentual

Tabela 4.2 – Equacionamento e unidades de medida das variáveis

Tipo	Variável	Equação	Unidade
	Aumento do Investimento em Transporte devido o congestionamento	IF THEN ELSE (Congestionamento > 1, Percentual do PIB × A, 0)	Percentual
	Quilômetro de trilhos (VLT) solicitados	(J × Investimento em trilhos (VLT))/Preço do Km de trilho (VLT)	KM
	Quilômetro de trilhos (Trem) solicitados	(F × Investimento em trilhos (Trem))/Preço do Km de trilho (Trem)	Km
	Quilômetro de trilhos (Metrô) solicitados	(H × Investimento em trilhos (Metrô))/Preço do Km de trilho (Metrô)	Km
	Quilômetro de vias solicitados	(D × Investimento em vias)/Preço do Km de via	Km
	Congestionamento	(Distância total percorrida por Veíc. Coletivo + Distância total percorrida por Veíc. Individual)/Capacidade do Sistema	Percentual
	Distância total percorrida por Veíc. Coletivo	(Viagens com ônibus/0) × Distância média por viagem (Ônibus)	Km
	Distância total percorrida por Veíc. Individual	(Viagens com Transporte Individual/P) × Distância média por viagem (Veíc. Individual)	Km
	Capacidade do Sistema	365 × Quilometragem total de vias urbanas*Distância percorrida por Km de via	Km
Auxiliar	Emissões do Transporte Individual	Viagens com Transporte Individual × Kg de CO ₂ por passageiro-Km (Carro) × Distância média por viagem (Veíc. Individual)	Kg de CO ₂
	Emissões do Transporte Público	Emissões de CO ₂ (Ônibus) + Emissões de CO ₂ (Trem) + Emissões de CO ₂ (Metrô) + Emissões de CO ₂ (VLT)	Kg de CO ₂
	Emissões de CO ₂ (Ônibus)	Viagens com Ônibus × Kg de CO ₂ por passageiro-Km (Ônibus) × Distância média por viagem (Ônibus)	Kg de CO ₂
	Emissões de CO ₂ (Metrô)	Viagens com Ônibus × Kg de CO ₂ por passageiro-Km (Metrô) × Distância média por viagem (Metrô)	Kg de CO ₂
	Emissões de CO ₂ (VLT)	Viagens com Ônibus × Kg de CO ₂ por passageiro-Km (VLT) × Distância média por viagem (VLT)	Kg de CO ₂
	Emissões de CO ₂ (Trem)	Viagens com Ônibus × Kg de CO ₂ por passageiro-Km (Trem) × Distância média por viagem (Trem)	Kg de CO ₂
	Rede de transporte de média e alta capacidade	Quilometragem total de trilhos (Trem) + Quilometragem total de trilhos (Metrô) + Quilometragem total de trilhos (VLT) + x × Quilometragem total de vias urbanas	Km
	RTR	Rede de transporte de média e alta capacidade/(População/1.000.000)	Km/milhão de Habitantes
	Área Coberta	Rede de transporte de média e alta capacidade/Área Urbana	Km de T.M.A.C. por Km ²

Fonte: Elaborado pelo autor.

Algumas variáveis auxiliares deste modelo não serão calculadas e, por isso, serão utilizados valores encontrados em referências. Sendo assim, a Tabela 4.3 apresenta essas variáveis e as suas respectivas unidades.

Tabela 4.3 – Unidade de medida das variáveis encontradas em outras referências

Variável	Unidade
Taxa de crescimento da População	Percentual
Taxa média de viagem	Viagem/Habitante
Atratividade do Modo não Motorizado	Percentual
Atratividade do Transporte Público	Percentual
Percentual do PIB	Percentual
Taxa de crescimento do PIB	Percentual
Preço do Km de trilho (VLT)	R\$/Km
Preço do Km de trilho (Trem)	R\$/Km
Preço do Km de trilho (Metrô)	R\$/Km
Preço do Km de Vias	R\$/Km
Distância percorrida por Km de via	Adimensional
Distância média por viagem (Ônibus)	Km/Viagem
Distância média por viagem (Veíc. Individual)	Km/Viagem
Kg de CO ₂ por passageiro-Km (Veíc. Individual)	Kg CO ₂ /pass.Km
Kg de CO ₂ por passageiro-Km (Ônibus)	Kg CO ₂ /pass.Km
Kg de CO ₂ por passageiro-Km (Trem)	Kg CO ₂ /pass.Km
Kg de CO ₂ por passageiro-Km (Metrô)	Kg CO ₂ /pass.Km
Kg de CO ₂ por passageiro-Km (VLT)	Kg CO ₂ /pass.Km
Distância média da viagem (Trem)	Km
Distância média da viagem (Metrô)	Km
Distância média da viagem (VLT)	Km
Taxa de desenvolvimento urbano	Percentual

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.9 Considerações Finais

Este capítulo apresentou detalhadamente o processo de desenvolvimento de um modelo de apoio à decisão, utilizando a DS como ferramenta de modelagem e simulação, para verificar a eficácia da PNMU. No DCE proposto é possível verificar como as variáveis do sistema se relacionam. Após a listagem e a classificação de todas as variáveis, foi possível construir o DEF e realizar o equacionamento de todas as variáveis do modelo. Por fim, foram apresentadas as unidades de medida de todas variáveis utilizadas, permitindo que a consistência dimensional das equações seja verificada em futuras aplicações.

O modelo proposto pode ser aplicado em diversas cidades brasileiras. Entretanto, vale ressaltar que, em alguns casos, pode ser necessário realizar alguma adaptação. Neste contexto, a seguir são apresentados os parâmetros necessários para a realização do estudo de caso na cidade do Rio de Janeiro.

5 ESTUDO DE CASO

Com o intuito de verificar a aplicabilidade do modelo proposto, um dos objetivos deste trabalho é desenvolver um estudo de caso na cidade do Rio Janeiro. Sendo assim, a seguir apresenta-se uma breve descrição da área de estudo e os parâmetros necessários para a simulação do modelo. Além de expor os parâmetros coletados para cada submodelo, este capítulo também apresenta as considerações realizadas para adaptar alguns parâmetros ao estudo de caso.

5.1 Descrição da Área de Estudo

A cidade do Rio de Janeiro é a capital do estado do Rio de Janeiro e está localizada na região sudeste do Brasil, como pode ser visto na Figura 5.1. Com uma área territorial de 1.200,177 km², o Rio de Janeiro está situado a 22°54'23" de latitude sul e 43°10'21" de longitude oeste, de modo que as suas divisas marinhas sejam mais extensas que as terrestres (IBGE, 2017b; Prefeitura do Rio de Janeiro, 2009). Esta cidade está dividida em 33 regiões administrativas com 160 bairros (Prefeitura do Rio de Janeiro, 2018a).

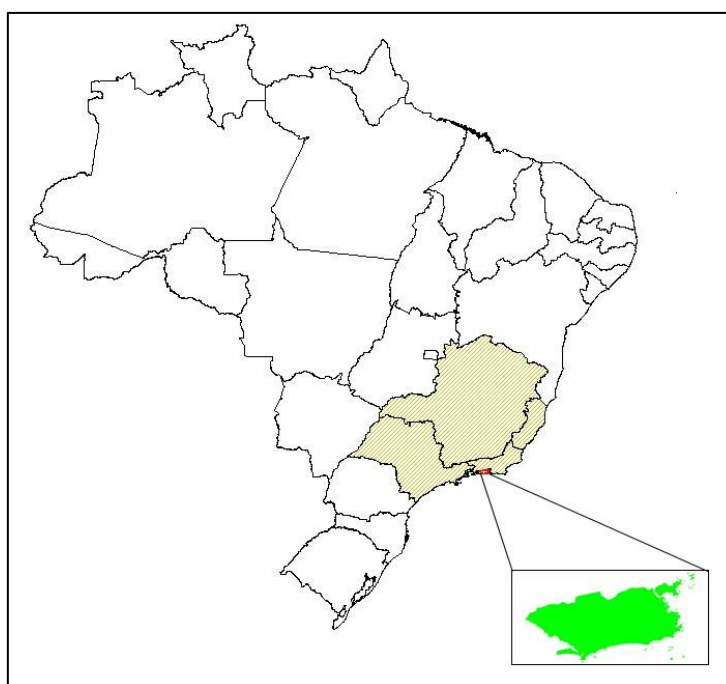


Figura 5.1 – Localização Geográfica do Rio de Janeiro

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com uma população estimada em aproximadamente em 6,5 milhões habitantes, o Rio de Janeiro é a segunda maior metrópole do Brasil e a quarta maior da América, resultando em uma densidade demográfica de 5.265,82 habitantes/km² (IBGE, 2018;

CAU/BR, 2014; IBGE, 2010). Além disso, este município possui o segundo maior PIB nacional, obtendo um PIB *per capita* de R\$ 49.527,98 (IBGE, 2015).

Esse destaque econômico é justificado pelo fato da cidade do Rio de Janeiro ser a sede das três maiores empresas brasileiras e de muitas outras potências do país (Juliboni, 2013). Além disso, o Rio de Janeiro é considerado um dos portões de entrada do Brasil, uma vez que é a cidade que mais recebe estrangeiros pelo motivo de lazer (Brasil, 2013). Isto ocorre devido ao elevado número de eventos que ocorrem na cidade e também devido às atrações naturais. Deste modo, o turismo movimenta a economia local e também destaca o município internacionalmente.

A cada ano que passa o desenvolvimento econômico e social do Rio de Janeiro é maior e, conseqüentemente, o sistema de transporte urbano está ficando cada vez mais complexo. De acordo com o Plano Diretor de Transporte Urbano da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (PDTU-RMRJ), são realizados aproximadamente 13 milhões de deslocamentos diários no município do Rio de Janeiro (Governo do Estado do Rio de Janeiro, 2015). Devido a sua complexidade e as exigências para atender a atual demanda, o sistema de transporte deste município é apresentado a seguir.

5.1.1 O Sistema de Transporte Urbano da Cidade do Rio de Janeiro

A cidade do Rio de Janeiro possui um dos maiores sistemas de transporte do Brasil. A rede de transportes deste município, apresentada no Anexo A, é composta por 170 km de trilhos de trens, 125 km de linhas de ônibus em sistema BRT's, 58 km de metrô, 12 km de VLT, 54 km de linhas de ônibus em sistema *Bus Rapid Service* (BRS), 420 km de ciclovias e 4 linhas de barcas sobre a Baía de Guanabara (SuperVia, 2016; BRTRIO, 2018; Invepar, 2018; VLT Carioca, 2018; Prefeitura do Rio de Janeiro, 2017).

A medição da mobilidade urbana, realizada a partir do Plano de Mobilidade Urbano Sustentável (PMUS), aponta que, do total de 12.595.855 deslocamentos diários, as viagens com transporte coletivo correspondem a 47,33%, ou seja, aproximadamente o dobro das viagens com transporte individual. A distribuição de viagens é apresentada detalhadamente na Figura 5.2.

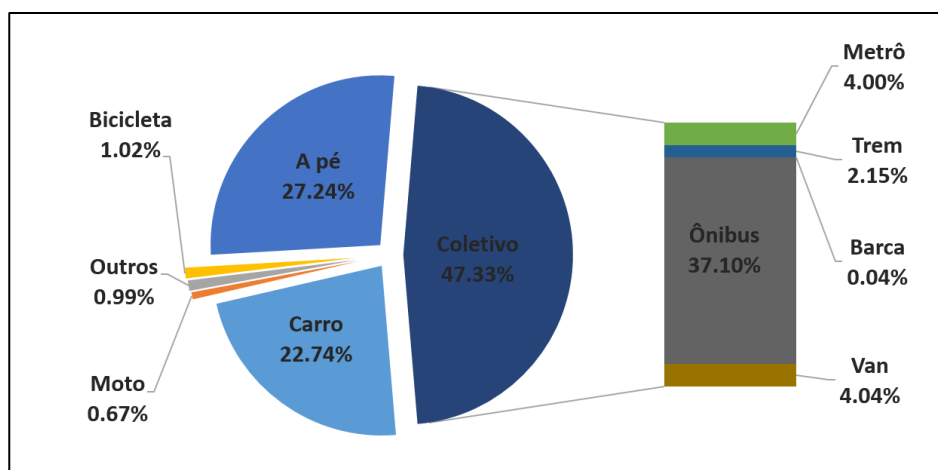


Figura 5.2 – Característica dos deslocamentos no Rio de Janeiro
 Fonte: Prefeitura do Rio de Janeiro (2014).

Os sistemas de transportes são compostos por diversos agentes. Nesses sistemas, destacam-se os usuários que determinam quando, onde e qual modo de transporte vão utilizar e, também, as autoridades e os provedores de serviços que decidem sobre a instalação de infraestruturas e o fornecimento de serviços de transporte para atender essa demanda. A agregação desses comportamentos e decisões resultam nas características do sistema, bem como nos níveis de utilização do transporte público (Etemma, 2015). Portanto, a seguir são apresentados os principais de transportes que compõe o sistema de transporte público do Rio de Janeiro.

Vale ressaltar que os modos van e barca não serão abordados nesse estudo. Devido a insatisfação dos usuários dos serviços de transporte público, na década de 90 surgiram modalidades de “transporte pirata”, também conhecidos como “transportes alternativos” (Brasil, 2015c). Atualmente existe uma regulamentação para transportes alternativos como, por exemplo, vans e moto-táxis. Entretanto, apesar da legalização dessas modalidades, ainda existe um movimento de oferta de ilegal de transporte coletivo (Vasconcellos; Mendonça, 2010). Portanto, apesar da sua representatividade, como pode ser visto na Figura 5.2, o modo de transporte van não foi abordado nessa pesquisa devido à dificuldade em obter dados sobre o mesmo. Além disso, o modo barca também não foi considerado nesta pesquisa devido a sua baixa participação nos deslocamentos na cidade do Rio de Janeiro.

5.5.1.1 Ônibus

De acordo com o Sindicato das Empresas de Ônibus da Cidade do Rio de Janeiro - Rio Ônibus, as empresas de ônibus do Rio de Janeiro estão agrupadas em quatro

consórcios: Intersul, Internorte, Transcarioca e Santa Cruz. Deste modo, a cidade é dividida em quatro regiões e cada consórcio é responsável pela prestação de serviços em uma das regiões (Rio Ônibus, 2018).

Para suprir 712 linhas e serviços, o Rio de Janeiro possui uma frota de 8.767 veículos que possuem uma idade média de 4,72 anos (Prefeitura do Rio de Janeiro, 2014; FETRANSPOR, 2018). Além disso, aproximadamente 30% da frota possui ar condicionado e 76% dos ônibus possuem equipamentos de acessibilidade (Prefeitura Rio de Janeiro, 2014).

A cidade do Rio de Janeiro possui 17 corredores, chamados de BRSs (Bus Rapid Service), que são distribuídos em um pouco mais de 50 km e realizam as principais ligações viárias do município (Alves, 2017). Por meio de faixas exclusivas sem segregação da via, o BRS é um sistema que engloba a priorização e a racionalização do transporte público por ônibus (FETRANSPOR, 2013).

Além dos serviços prestados pelos quatro consórcios, a cidade do Rio de Janeiro possui veículos operados pelo acordo operacional BRT. O *Bus Rapid Transit* (BRT) é um sistema de transporte urbano que, a partir da provisão de infraestrutura segregada com prioridade de passagem, proporciona mobilidade urbana rápida, confortável e com um custo eficiente (Wright; Hook, 2007). Em outras palavras, o BRT consiste em um transporte articulado que trafega em um corredor exclusivo.

Assim como os ônibus, o BRT do Rio de Janeiro é administrado por um consórcio composto por um grupo de empresas privadas. Nessa cidade, o BRT é composto por três corredores (Transoeste, Transcarioca e Transolímpica) e possui uma frota de 440 ônibus, transportando 450 mil pessoas por dia (BRTRIO, 2018).

5.1.1.2 Metrô

Em funcionamento desde de 1979, o metrô do Rio de Janeiro começou a sua operação transportando uma média diária de 60 mil passageiros (MetrôRio, 2014). Atualmente, com 41 estações, três linhas em atividade, 14 pontos de integração e uma frota de 64 trens com ar-condicionado, o MetrôRio transporta diariamente uma média de 850 mil usuários (Governo do Rio de Janeiro, 2018).

A Invepar é a empresa responsável pela administração, manutenção e operação das Linhas 1 e 2 do sistema metroviário do Rio de Janeiro. Deste modo, esta empresa é responsável pela gestão de 36 estações e 42 quilômetros de trilhos. Além disso, em 2016, esta empresa passou a prestar serviços de operação e manutenção da Linha 4, composta

de 5 estações, construídas e inaugurada pelo Governo do Estado do Rio de Janeiro (Invepar, 2018). De maneira geral, a Invepar possui 100% de participação na estrutura acionária do RioMetrô que é composto por 58 km de trilhos, dos quais 22 km estão na superfície.

5.1.1.3 VLT

O Veículo Leve sobre Trilhos (VLT) é um modelo sustentável de transporte que está entre o metrô e o ônibus convencional (FETRANS, 2018). O VLT consiste em um sistema ferroviário metropolitano caracterizado pela sua capacidade de trabalhar com carros individuais ou trens curtos ao longo de passagens exclusivas a nível do solo, oferecendo um serviço de transporte público em corredores urbanos movimentados e conectando os principais destinos (VTPI, 2015).

O VLT Carioca integra bairros da Região Portuária ao Centro e, por isso, é a principal conexão para as pessoas que circulam pela área central da cidade do Rio (VLT Carioca, 2018a). De acordo com a ouvidoria do VLT Carioca (2018b), a rede em operação tem aproximadamente 12 km de percurso, sendo 6,5 km da Linha 1 e 5,5 km da Linha 2. Entretanto, são aproximadamente 25 km de trilhos, considerando os trechos em via singela. Atualmente, a terceira linha, que ligará a Central do Brasil ao Aeroporto Santos Dumont, está em construção e possui 1 km de percurso. Os veículos utilizados são compostos por 7 módulos integrados e possuem capacidade para transportar 420 passageiros (Prefeitura do Rio de Janeiro, 2014). Deste modo, com uma frota de 32 veículos, o VLT Carioca transporta uma média diária de 65 mil pessoas (VLT Carioca, 2018b).

5.1.1.4 Trem

Através de uma malha ferroviária de 270 km, a SuperVia opera um serviço de trens urbanos na Região metropolitana do Rio de Janeiro, atendendo 12 cidades (Rio de Janeiro, Duque de Caxias, Nilópolis, Mesquita, Nova Iguaçu, Queimados, Japeri, São João do Meriti, Belford Roxo, Paracambi, Magé e Guapimirim).

A malha ferroviária é dividida em cinco ramais, três extensões e 102 estações. Com uma frota de 201 trens, a SuperVia transporta, em média, 600 mil passageiros por dia (SuperVia 2016). Vale ressaltar que mais de 60% dos trilhos (170 Km) estão localizados no município do Rio de Janeiro.

5.1.2 *Desafios da Mobilidade Urbana no Rio de Janeiro*

A extensão territorial somada a complexidade das atividades desenvolvidas no espaço urbano dificulta o planejamento de transportes no Rio de Janeiro. Além disso, esta cidade possui um sistema de transporte aquém de suas necessidades e, por isso, vive uma crise em sua mobilidade urbana (Costa *et al.*, 2013; Rodrigues, 2016b).

Um estudo realizado pela Expert Market (2018) mostra que o Rio de Janeiro apresenta um dos piores sistemas de transporte do mundo. De acordo com esta pesquisa, o tempo médio do deslocamento dos cariocas é de 95 minutos, resultando em 51 horas gastas em congestionamento durante 240 dias. Os resultados deste estudo também apontam que 62% da população necessita de mais de um meio transporte para realizar o seu deslocamento diário. Além disso, o custo mensal com passagens corresponde a 9,40% da renda da população.

De acordo com a TomTom (2017), o Rio de Janeiro é a cidade brasileira que apresenta o maior nível de congestionamento (47%), ocupando o oitavo lugar no *ranking* mundial. Ainda de acordo com esta fonte, este valor chega a 63% no horário de pico pela manhã e 81% no horário de pico da tarde, resultando em um aumento diário de 43 minutos no tempo de viagem dos cariocas.

Para Alves (2017) a prioridade ao ônibus é uma urgência e corredores exclusivos são uma solução para os problemas de mobilidade. Entretanto, a autora aponta que o último BRS carioca é de 2015, evidenciando que o BRS não teve sequência em sua implantação. Outra questão levantada pela autora é a necessidade de melhorar a integração física e tarifária entre os serviços de transporte. Um grande avanço neste quesito foi a criação do Bilhete Único em 2010, mas ainda é preciso melhorar o sistema alimentador dos meios de transporte da cidade.

No Rio de Janeiro, 52% das pessoas residem próximas a rede de transporte de média e alta capacidade, ou seja, aproximadamente metade da população carioca reside a mais de 1 km das estações de transporte de média e alta capacidade (ITDP, 2018). Sendo assim, além do transporte motorizado, o planejamento da mobilidade urbana envolve os trajetos realizados a pé e em bicicleta, que correspondem a 3,5 milhões de viagens diárias no Rio de Janeiro (Prefeitura do Rio de Janeiro, 2017).

De acordo com o estudo da Secretaria de Urbanismo do Rio de Janeiro, aproximadamente 74% das viagens diárias utilizam as ruas e calçadas como parte do percurso para ter acesso ao meio de transporte (Prefeitura do Rio de Janeiro, 2017).

Entretanto, apesar de 86% dos domicílios do município possuírem calçadas, apenas 9% possuem rampas para cadeirantes no seu entorno (ITDP, 2018).

Para Veloso e Santiago (2017), a mobilidade urbana não se resume apenas a dinâmica do funcionamento dos transportes públicos e a qualidade da infraestrutura oferecida à população, mas também ao fator da violência urbana que tem interferido no direito de ir e vir do cidadão. Um estudo realizado pelos autores no Complexo do Alemão mostra como a violência impacta nos deslocamentos da população e, também, destaca a precariedade do serviço público de transporte na região. A violência afeta a dinâmica cotidiana dos moradores da comunidade que são impedidos de realizar atividades básicas. Por meio de expressões como “*Nem entra, nem sai, espera tudo acalmar, não saio de casa*”, os entrevistados relatam que não há estratégias que torne possível a mobilidade em situações de violência urbana. Além disso, os resultados dessa pesquisa mostram a dificuldade dos moradores da comunidade para se locomover no Rio de Janeiro. Do total de entrevistados, 52,2% utilizam ônibus para se locomover na cidade, sendo que, desse montante, 47,3% necessitam de dois ou mais ônibus para chegar ao seu destino. Além disso, a população precisa recorrer a outros meios de transporte (bicicleta, van, moto-taxi, a pé, moto, entre outros) para suprir a falta do transporte público dentro da comunidade.

Buscando solucionar os problemas relacionados mobilidade urbana e de outras áreas, em 2016, a prefeitura do Rio de Janeiro lançou dois planos: o Plano Estratégico 2017-2020 e o Visão Rio 500. O primeiro plano apresenta 59 iniciativas e 68 metas para 2020. Já o segundo plano apresenta diretrizes para a cidade até o ano de 2065, quando o Rio de Janeiro completará 500 anos (Prefeitura do Rio de Janeiro, 2016a). Ambos os planos adotam o indicador de Percentual de Pessoas Próximas a Rede de Transporte de Média e Alta Capacidade (PNT) e os oito princípios do Desenvolvimento Orientado ao Transporte Sustentável (DOTS), o que é grande um avanço no planejamento sustentável das cidades (ITDP, 2016).

Portanto, nota-se que a crise na mobilidade urbana na cidade do Rio de Janeiro é de conhecimento da administração pública e, conforme já discutido, medidas e planos de ação foram traçados para solucioná-la. Entretanto, algumas metas estabelecidas não são reais para o período de 2017-2020, podendo comprometer a finalidade do plano (Marques, 2017). Portanto, nota-se que além da desenvolver e implementar, é necessário o desenvolvimento de mecanismos para análise e controle de tais medidas.

5.2 Parâmetros do Estudo de Caso

Conforme discutido no Capítulo 5, o modelo proposto é composto por nove submodelos. O processo de obtenção dos parâmetros e as considerações necessárias para a simulação do modelo proposto são apresentadas a seguir. Vale ressaltar que se optou por um período de simulação de 32 anos, sendo 2018 o ano base (Ano = 0) e 2050 (Ano = 32) o último ano simulado.

5.2.1 Submodelo População

De acordo com o IBGE (2018), a população da cidade do Rio de Janeiro está estimada em 6.520.266 pessoas. Para determinar a taxa de crescimento da população deste município, foi realizada uma projeção populacional até o ano de 2050 por meio do método AiBi, o qual é apresentada no APÊNDICE A. Optou-se por este método, pois o mesmo já foi aplicado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) na projeção da população das cidades brasileiras (IBGE, 2008). Com essa projeção, foi possível calcular a taxa de crescimento populacional entre os anos de 2018 e 2050. Para inserir essas projeções como uma função no modelo, foi realizado uma regressão linear, apresentada na Figura 5.3.

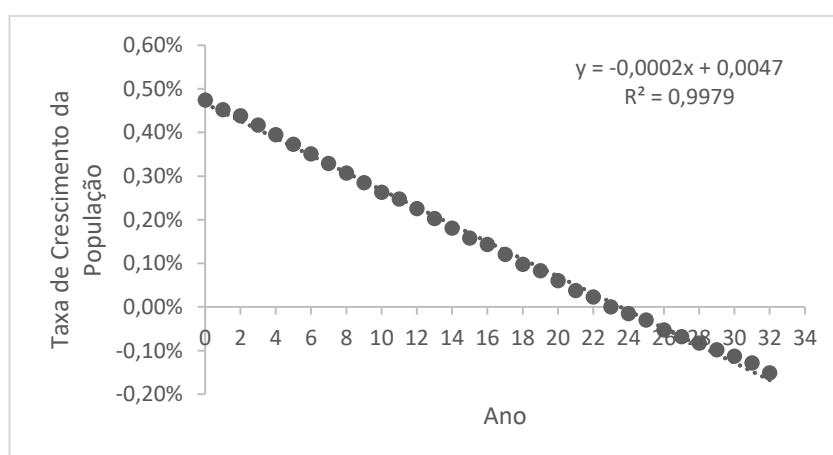


Figura 5.3 – Projeção da taxa de crescimento da População do Rio de Janeiro
Fonte: Elaborado pelo autor.

Sendo assim, a variável “Taxa de crescimento da população” foi definida pela Equação (5.1):

$$\text{Taxa de Crescimento da População} = -0,0002 \times \text{Time} + 0,0047 \quad (5.1)$$

onde *Time* representa o ano da respectiva taxa de crescimento.

5.2.2 Submodelo Economia

Conforme já foi discutido, a cidade do Rio de Janeiro é um dos principais centros econômicos do Brasil com um PIB de, aproximadamente, 321 bilhões de reais (IBGE, 2015). Para o cálculo da taxa de crescimento do PIB, foi analisado a variação do PIB do Rio de Janeiro durante um período de 10 anos. Como pode ser visto no Quadro 5.1, o PIB da cidade do Rio de Janeiro apresenta um crescimento anual médio de 10%.

Quadro 5.1 – Taxa de Crescimento do PIB da cidade do Rio de Janeiro

Produto Interno Bruto											
A preços correntes (R\$ 1.000.000.000,00)											
2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Média
123	133	145	163	187	208	230	253	284	300	321	213
Taxa de Crescimento	1,075	1,091	1,127	1,150	1,111	1,103	1,103	1,123	1,056	1,068	1,101

Fonte: Elaborado pelo autor com base em IBGE (2015).

Com base nos dados da Tabela 5.1 e nos dados apresentados no relatório de desempenho da cidade do Rio de Janeiro (Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro, 2016b), foi possível calcular a porcentagem do PIB desta cidade que é destinada a investimento em transporte. Com isso, observa-se que os investimentos em transportes da cidade do Rio de Janeiro representam em média 0,090% do PIB, como pode ser visto na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Percentual do PIB destinado a Transportes

Ano	PIB	Investimento em Transportes	% do PIB
2012	R\$ 253.200.785.000,00	R\$ 254.585.000,00	0,101%
2013	R\$ 284.299.248.000,00	R\$ 256.256.000,00	0,090%
2014	R\$ 300.270.151.610,00	R\$ 282.557.000,00	0,094%
2015	R\$ 320.774.458.940,00	R\$ 276.833.000,00	0,086%

Fonte: Elaborado pelo autor com base em IBGE (2015) e Prefeitura do Rio de Janeiro (2016b).

De acordo com a prestação de contas do Exercício de 2016 da Prefeitura do Rio de Janeiro (2016c), a verba destinada a infraestrutura urbana representou apenas 2,2% da dotação orçamentária do setor de transportes neste ano. Deste modo, adotou-se que 0,002% do PIB da cidade do Rio de Janeiro é destinado a infraestrutura urbana.

Como não foi encontrado na literatura um percentual de aumento do investimento em transporte devido ao congestionamento e nem um *delay* para esse aumento, foi adotado um aumento de 10% e um *delay* de 10 anos.

5.2.3 Submodelo Demanda de Transporte

De acordo o Governo do Estado do Rio de Janeiro (2015), em 2012 foram realizados mais de 13 milhões de deslocamentos diários no município do Rio de Janeiro. Considerando a população neste ano, observa-se que os moradores desta cidade realizam aproximadamente dois deslocamentos por dia. Como pode ser visto na Tabela 5.2, pode-se concluir que a taxa média de viagens anual é de 729,05 deslocamentos por pessoa.

Tabela 5.2 – Taxa média de viagem no Rio de Janeiro

População	Deslocamentos diários	Taxa média diária	Taxa média anual
6.391.651	13.853.000	2,17	792,05

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Governo do Estado do Rio de Janeiro (2015).

Para determinar a atratividade do modo não motorizado, estabeleceu-se uma relação entre a porcentagem de viagens com este modo e o nível de implementação da PNMU. De maneira análoga, utilizou-se a porcentagem de viagens com o transporte público e a PNMU para determinar a atratividade do transporte público. Essas relações foram realizadas com base em cenários de implementação de políticas de mobilidade urbana, os quais foram adaptados para a realidade do Rio de Janeiro.

Baseado nas projeções de Perkins+Will (2018) para o ano de 2050, foi construída uma curva *S-shaped*, apresentada na Figura 5.4, para representar a relação entre porcentagem de viagens com modos não motorizado no Rio de Janeiro e o nível de implementação da PNMU. Desta forma, considerou-se que na ausência de implantação, a porcentagem de viagens no transporte não motorizado está em um nível de 28% e, de acordo com as projeções, chegaria em 35%, caso a PNMU seja completamente atendida. Além disso, o atingimento deste valor ocorreria de acordo com um comportamento lento inicialmente. Superadas as dificuldades iniciais de implantação da política, o crescimento se torna exponencial até uma inversão na taxa de implantação que se estabiliza ao final da implementação da PNMU. Vale ressaltar que a escolha da função sigmóide para representar a atratividade do modo não motorizado se justifica pelo fato de que esta função apresenta um comportamento comumente observado em Dinâmica de Sistemas (Sterman, 2000).

O processo de construção desta função sigmóide é apresentado no APÊNDICE B. Portanto, a atratividade do modo não motorizado é definida por esta função que é apresentada na Equação (5.2).

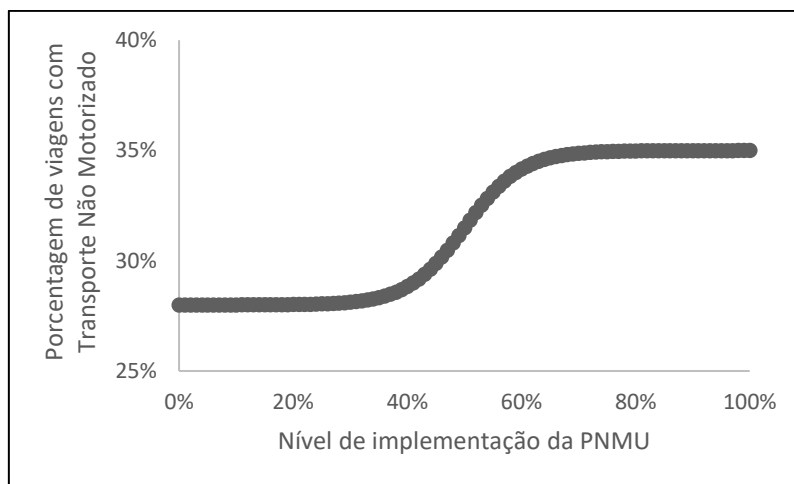


Figura 5.4 – Atratividade do Modo não Motorizado

Fonte: Elaborado pelo autor.

Atratividade do Modo não Motorizado

$$= 0,035 * \tanh[(10 \times PMNU) - 5] + 0,315$$

(5.2)

De maneira análoga a atratividade do modo não motorizado, foram utilizadas as projeções de SuM4All™ (2017) para determinar a atratividade do transporte público. Sendo assim, foi desenvolvida uma curva *S-Shaped*, apresentada na Figura 6.3, cujo o processo de formulação é o mesmo apresentado no APÊNDICE B, para representar a relação entre a porcentagem de viagens com transporte público no Rio de Janeiro e o nível de implementação da PMNU. Portanto, a atratividade do transporte público é definida por esta função, apresentada na Equação (5.3), com início em 66%, quando não há implementação da PNMU, atingindo 77,17% com a implementação total da política.

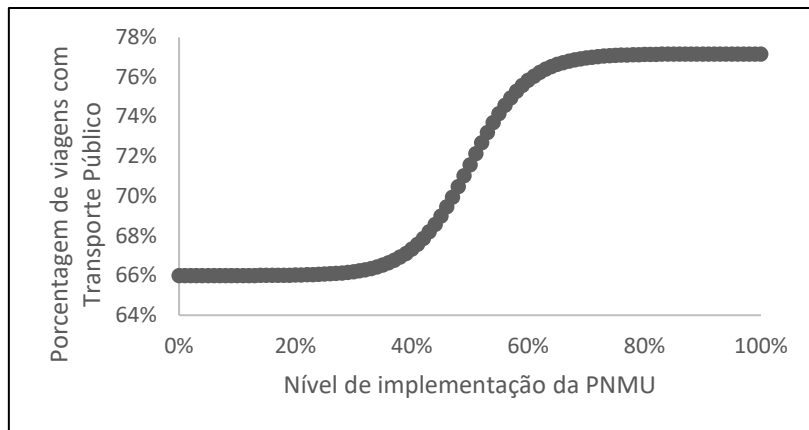


Figura 5.5 – Atratividade do Transporte Público
 Fonte: Elaborado pelo autor.

$$\begin{aligned}
 & \textit{Atratividade do Transporte Público} \\
 & = 0,05585 * \tanh[(10 \times PMNU) - 5] + 0,71585 \qquad (5.3)
 \end{aligned}$$

Conforme já discutido, neste trabalho a simulação será realizada entre os anos de 2018 (Ano 0) e de 2050 (Ano 32). Durante este período, o nível de implementação da PNMU aumentará linearmente até atingir 100% em 2050. Além disso, em função da medida provisória nº 748, de 2016, que ampliou o prazo para elaboração do Planos de Mobilidade Urbana para sete anos (contados da data de vigência da Lei 12.587/2012), considerou-se que a PNMU inicia sua implementação a partir de 2019, ou seja, no ano 1. Conforme discutido na seção 4.3, no modelo proposto, o nível de implementação da PNMU é definido pela função RAMP que possui como parâmetros de entrada a inclinação da curva, o período inicial e final da implementação. Portanto, a PNMU é definida conforme a Equação (5.4).

$$PMNU = RAMP(0,0322582, 1, 32) \qquad (5.4)$$

5.2.4 Submodelo Oferta de Transporte

Em relação à rede viária total, sabe-se que 1,57% das vias (172,8 Km) da cidade do Rio de Janeiro são destinadas a transporte de média e alta capacidade (ITDP; EMTU-SP, 2017). Com base nesse dado, foi possível calcular o tamanho da rede viária total do município que equivale a 11.000 km. A quilometragem total de trilhos para o metrô, trem e VLT são apresentadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Quilometragem total de trilhos por modo na cidade do Rio de Janeiro

Modo	Km
Metrô	58
Trem	170
VLT	12

Fonte: Invepar (2018), SuperVia (2016) e VLT Carioca (2018b).

Cada obra possui suas especificações e, por isso, cada projeto possui um cronograma. Deste modo, não foi encontrado na literatura um valor médio para o *delay* (planejamento, licitação e orçamento) do aumento da rede viária. Sendo assim, após a realização de entrevistas com especialistas na construção de vias urbanas, considerou-se um *delay* de 3 anos. De acordo com a Mercedes-Benz (2018), para veículos que utilizam trilhos leves e metrô o tempo médio para planejamento e construção é a 6 e 12 anos, respectivamente. Como não foi encontrado na literatura este prazo para metrô, adotou-se um valor intermediário de 9 anos.

Sabe-se que além das obras em andamento, não existem projetos de expansão do sistema metroferroviário (metrô e trem) e do VLT na cidade do Rio de Janeiro. A expansão desses modos ocorre de maneira lenta. No sistema ferroviário, por exemplo, após o início da operação em 1998, a SuperVia realizou a inauguração de apenas oito estações, sendo que seis foram inauguradas em 2016 devido aos Jogos Olímpicos (SuperVia, 2016). Sendo assim, optou-se por não simular a expansão desses modos. Deste modo, os fatores *B*, *C* e *D*, que representam o percentual do investimento em transporte destinado a expansão das linhas de metrô, de trem e de VLT, respectivamente, serão iguais a zero para este caso.

De acordo com DNIT (2018), o custo médio para implantação/pavimentação de uma pista simples é de R\$ 3.159.000,00 por quilômetro. Para determinar o preço por quilômetro de trilho do trem, metrô e VLT utilizou-se dados históricos. Como base nos investimentos realizados em projetos concluídos na cidade do Rio de Janeiro foi possível calcular o custo por quilometro de trilho de cada modo, o qual é apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Custo médio por quilômetro de trilho por modo

Modo	R\$/Km
Metrô	300.000.000
Trem	30.000.000
VLT	38.500.000

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Governo do Estado do Rio de Janeiro (2015) e Prefeitura do Rio de Janeiro (2014).

Por fim, foram coletados os dados relacionados a área da unidade territorial. De acordo com IBGE (2018), a cidade do Rio de Janeiro possui uma área de 1.200,177 Km². Para verificar a taxa de crescimento do espaço urbano, verificou-se a expansão nos últimos anos. Como pode ser visto na Tabela 5.5, o Rio de Janeiro apresentou uma pequena taxa de crescimento urbano nos últimos anos e, por isso, adotou-se uma taxa de 0,1%.

Tabela 5.5 – Área Territorial e taxa de crescimento

Ano	2013	2014	2015	2016	2017
Área Territorial (Km ²)	1197,463	1199,828	1200,179	1200,177	1200,177
Taxa de Crescimento	-	0,1975%	0,0293%	-0,0002%	0

Fonte: Elaborado pelo autor com base em IBGE (2017b).

5.2.5 Submodelo Transporte Público

Para identificar a divisão modal do transporte público no município do Rio de Janeiro, utilizou-se o número total de viagens realizadas no ano de 2017 por cada modo. Com base nesse número total foi calculada a taxa de utilização de cada modo nos deslocamentos do município. Essas taxas são apresentadas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Taxa de utilização de cada modo nos deslocamentos

Modo	Número de viagens por ano	Taxa de Utilização (%)
Ônibus	1.175.683.753	73,26
Metrô	244.709.929	15,25
Trem	160.663.338	10,01
VLT	23.725.000	1,48
Total	1.604.782.020	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Prefeitura do Rio de Janeiro (2018b) e VLT Carioca (2018b).

5.2.6 Submodelo Congestionamento

De acordo com a CNT e NTU (2017), as ocupações médias de automóveis e de ônibus é de 1,3 passageiros/veículo e 45 passageiros/veículo, respectivamente. Já a distância média por viagens realizadas com veículos individuais em grandes centros

urbanos é de 7,4 Km (ANTP, 2016). Para as viagens realizadas por ônibus, utilizaram-se as informações do PDTU de 2015 (Governo do Estado do Rio de Janeiro, 2015) referentes a quantidade de passageiros transportados (Pax) e passageiros por Km (Pax.Km). Sendo assim, a partir da razão entre Pax.Km e Pax, foi possível obter a distância média de viagens por ônibus que é de 10,2 Km.

Por fim, verificou-se o parâmetro da variável “Distância percorrida por Km de via” ou VKT *per lane* (da sigla em inglês para *Vehicle-Kilometers Traveled per lane*). Entretanto, não foram encontrados valores referentes a esta medida no Brasil e, por isso, utilizou-se o valor fornecido pelo Departamento de Transporte dos Estados Unidos. Deste modo, esta variável, que é adimensional, assume o valor de 1317 (Bureau of Transportation Statistics, 2017).

5.2.7 Submodelo Meio Ambiente

Devido à dificuldade de encontrar a quantidade de CO₂ já emitida pelo sistema de transporte da cidade do Rio de Janeiro, este trabalho considera que o estoque inicial de poluentes é zero. Os cálculos deste submodelo são baseados na distância média percorrida por viagem de cada modo e a quantidade (em quilos) de CO₂ emitida por passageiro por quilômetro percorrido.

Para a obtenção da distância média por viagem dos modos metroferroviários foi realizado o mesmo cálculo utilizado na obtenção da distância média das viagens realizadas por ônibus. Sendo assim, com base nos dados do Governo do Estado do Rio de Janeiro (2015), obteve-se uma distância média de 11,6 km e 20,5 km para o metrô e o trem, respectivamente.

De acordo com a ouvidoria do VLT Carioca, este modo possui uma velocidade média de 15 km/h e o tempo médio de viagem por passageiro é de 13 minutos (VLT Carioca, 2018b). Com isso, foi possível calcular a distância média das viagens: 3,25 km por viagem. Já as informações relacionadas a emissão de CO₂ por passageiro de cada modo, os índices utilizados estão apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Emissão de CO₂ por modo de transporte

Modo	Kg de CO₂/pass.Km
Carro	0,1268
Ônibus	0,0160
Metrô	0,0035
Trem	0,0055
VLT	0,00465

Fonte: Carvalho (2011), Andrade *et al.* (2017), Brasil (2014).

5.3 Considerações Finais

Com intuito de atingir o objetivo desta dissertação em realizar um estudo de caso, este capítulo apresentou a descrição da área de estudo e os parâmetros coletados para cada submodelo do modelo proposto. Entretanto, não foi encontrado na literatura parâmetros referentes a cidade do Rio de Janeiro para algumas variáveis. Para esses casos, foi necessário realizar adaptações de valores referentes a outras localidades e/ou considerações baseadas em referências encontradas na literatura.

Frente a descrição da área de estudo e a coleta dos parâmetros, torna-se possível a simulação do modelo proposto e, conseqüentemente, analisar o impacto da PNMU na cidade do Rio de Janeiro. Diante disso, o próximo capítulo apresenta as características e os objetivos dos cenários desenvolvidos e, também, a análise dos seus resultados.

6 CENÁRIOS E RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DINÂMICA

Antes de realizar a simulação de um modelo é necessário testar a sua confiabilidade, ou seja, verificar se o mesmo representa o sistema real de maneira adequada. Portanto, este capítulo apresenta a aplicação dos testes no modelo proposto conforme indicado na literatura. Posteriormente, descreve-se os cenários desenvolvidos para as simulações dos estudos de caso. Por fim, são apresentados os resultados obtidos, bem como discussões e análises a respeito dos mesmos.

6.1 Teste do Modelo Proposto

Como todos os modelos são representações limitadas do mundo real, é necessário verificar se o procedimento, os objetivos e os resultados dos mesmos são aceitáveis (Sterman, 2000). Deste modo, após o desenvolvimento, equacionamento matemático e obtenção dos parâmetros externos do modelo proposto, é necessário verificar a confiabilidade do mesmo. De acordo com a classificação de Zagonel e Cobert (2006), o modelo proposto é classificado como modelagem quantitativa. Conforme apresentado Capítulo 3, os testes mais apropriados para este tipo de modelagem são: adequação do limite, avaliação da estrutura, consistência dimensional, erro de integração e condição extrema. Esses testes são apresentados a seguir.

O primeiro teste realizado foi o de adequação do limite. Neste teste verificou-se a omissão de *loops* importantes no modelo e, também, constantes exógenas que deveriam ser consideradas variáveis do modelo. Como resultado, observou-se que a variável taxa de crescimento da população poderia ser obtida pelo modelo ao invés de ser considerada uma constante exógena. Além disso, verificou-se a omissão de um importante *loop* no modelo. Devido à ausência da relação entre o congestionamento e o investimento em transportes, o *loop* entre economia e congestionamento estava ausente.

No teste de avaliação da estrutura foi verificado se o modelo respeita as leis básicas da física e, também, se captura o comportamento adequado dos componentes do sistema. Por meio do DCE, DEF e da inspeção direta das equações, verificou-se que o modelo reproduz o comportamento esperado do sistema. Além disso, nenhuma variável apresenta um comportamento que desrespeite as leis físicas como, por exemplo, uma variável de estoque assumindo valores negativos.

Posteriormente foi realizado o teste de consistência dimensional. Deste modo, foram verificadas as unidades de medida de todas as variáveis e a consistência

dimensional de todas as equações. Para isso, foi utilizado o comando “*Check Units*” do *software* Vensim, o qual reporta a lista de erros encontrados no modelo. Deste modo, todas as inconsistências apontadas foram corrigidas.

Também foi realizado o teste de erro de integração. Como pode ser visto no APÊNDICE C, verificou-se o resultado do modelo para diferentes tempos de integração. Como resultado, observou-se que o modelo apresenta um comportamento realista para diferentes valores de tempo e, por isso, optou-se pelo *time step* de 1 ano.

Em seguida, foi realizado o teste de condição extrema, apresentado no APÊNDICE D, para verificar se o modelo se comporta de maneira realista sob políticas e situações extremas. Para isso, foram simuladas situações extremas, testando valores extremos para as variáveis como, por exemplo, taxa de crescimento da população igual a zero. Neste caso, observa-se uma maior redução no nível de congestionamento, devido ao número fixo do total de viagens ao longo dos anos.

Após a verificação do modelo e a realização das correções necessárias, foi realizada a simulação do modelo proposto. Além disso, foram desenvolvidos diferentes cenários os quais são apresentados a seguir.

6.2 Definição dos Cenários de Simulação

O primeiro cenário analisado neste estudo é o cenário base, o qual foi utilizado na aplicação dos testes do modelo. Este cenário consiste na simulação do modelo proposto utilizando os parâmetros apresentados no Capítulo 5. Primeiramente foi verificado se o modelo representa o sistema real e em seguida foi realizada uma análise dos resultados.

Além da simulação do cenário base, foram desenvolvidos quatro cenários. Esses cenários avaliam de forma independente aspectos relativos a elementos de um determinado submodelo. A Tabela 6.1 apresenta um resumo dos quatro cenários propostos, destacando as variáveis simuladas, os parâmetros utilizados e o impacto analisado em cada cenário proposto, os quais serão detalhados a seguir.

Tabela 6.1 – Descrição dos cenários propostos

Cenários	Variáveis	Valores avaliados	Impacto
1	PNMU	0	Congestionamento; Emissão Total de CO ₂
2	Distância total percorrida por veículo individual	Número de pessoas por veículo: 2 e 3	Congestionamento
3	Solicitação do Aumento	<i>Delay</i> : 5, 15, 20 anos	Congestionamento; RTR, Área Coberta
4	<i>B, C, D</i>	25%	RTR, Área Coberta

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para evidenciar o impacto da implementação da PNMU apresentado no cenário base, o Cenário 1 apresenta os impactos da não implementação da PNMU. Deste modo, esse cenário simula o modelo atribuindo o valor zero ao nível de implementação da PNMU. Além disso, este cenário considera a taxa de crescimento do transporte motorizado e do transporte individual nos últimos anos.

O Cenário 2 buscou verificar o impacto do número médio de pessoas por veículos individuais no nível de congestionamento. Conforme discutido no Capítulo 5, considerou-se uma média de 1,3 pessoas por veículo no Cenário Base. Deste modo, foi verificado o impacto no congestionamento quando a taxa de ocupação por veículo é de 2 e 3 pessoas.

Considerou-se no Cenário Base um *delay* de 10 anos para representar o período de solicitação do aumento no investimento em infraestrutura de transporte devido o congestionamento. Por isso, o Cenário 3 verifica o impacto deste *delay* no sistema analisado. Por fim, o Cenário 4 busca identificar como seria o contexto da mobilidade urbana na cidade do Rio de Janeiro se os investimentos em infraestrutura de transporte de média e alta capacidade fossem constantes.

6.3 Análise dos Resultados do Cenário Base

Das 5,16 bilhões de viagens realizadas no ano 0, observa-se que apenas 28% são realizadas pelo modo não motorizado. Com um aumento de aproximadamente 5%, no ano 32, verifica-se que 5,43 bilhões de viagens são realizadas, das quais 35% ocorrem por modos não motorizados. Sendo assim, observa-se um aumento de 31% no número de viagens com o modo não motorizado, passando de 1,44 bilhões para 1,90 bilhões em 32 anos, como pode ser visto na Figura 6.1(a). Observa-se na Figura 6.1(b) que o número de

viagens com modo motorizado reduz de 3,71 bilhões no ano 0 para 3,53 bilhões no ano 32, ou seja, 5% de redução.

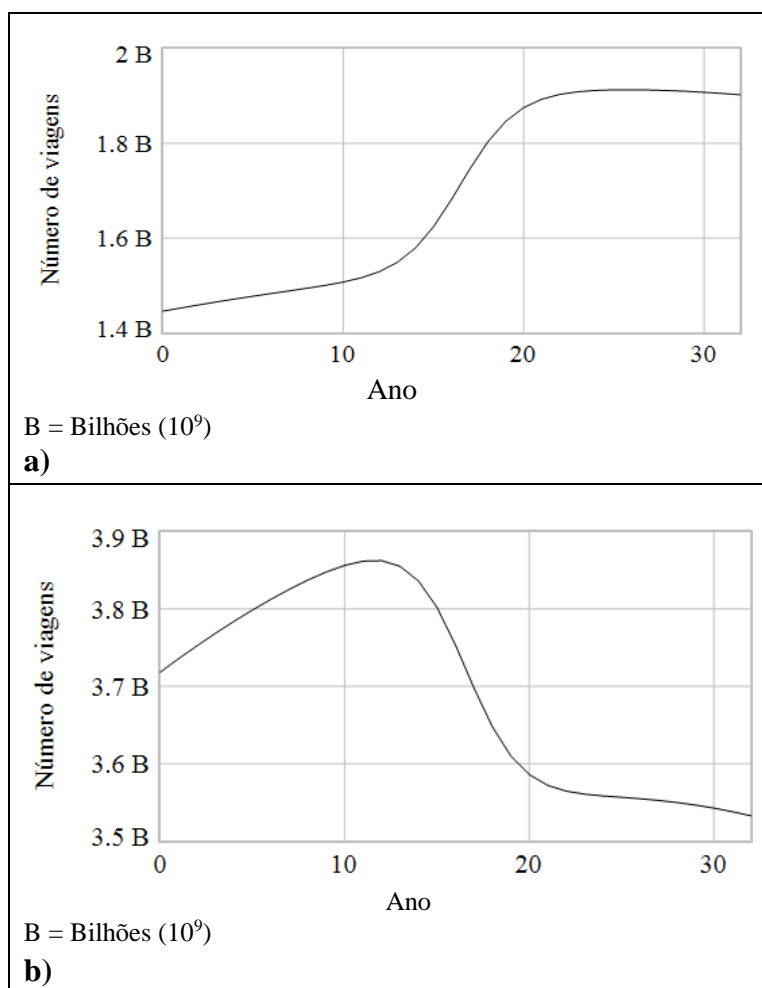


Figura 6.1 – Número de viagens com Modo não Motorizado (a) e com Modo Motorizado (b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

No ano 0, 66% das viagens com modo motorizado são realizadas por transporte público, resultando em 2,45 bilhões de viagens por ano. Conforme a Figura 6.2, no ano 25 ocorre o maior número de viagens com transporte público, que é de 2,74 bilhões de viagens. Porém, este valor reduz para 2,72 bilhões no ano 32. Apesar do aumento no nível de implementação da PNMU, a redução do número de viagens com transporte público ocorre devido à redução do número de viagens realizadas com o modo motorizado. Entretanto, ao analisar a divisão modal, observa-se que o número de viagens com transporte público representa 77,08% e 77,17% das viagens com modos motorizados nos anos 25 e 32, respectivamente. Já o transporte individual, que representa 34% das viagens

motorizadas no ano 0, passa a representar apenas 22,83% no ano 32, resultando em uma redução de 457 milhões de viagens por ano, como pode ser visto na Figura 6.3.

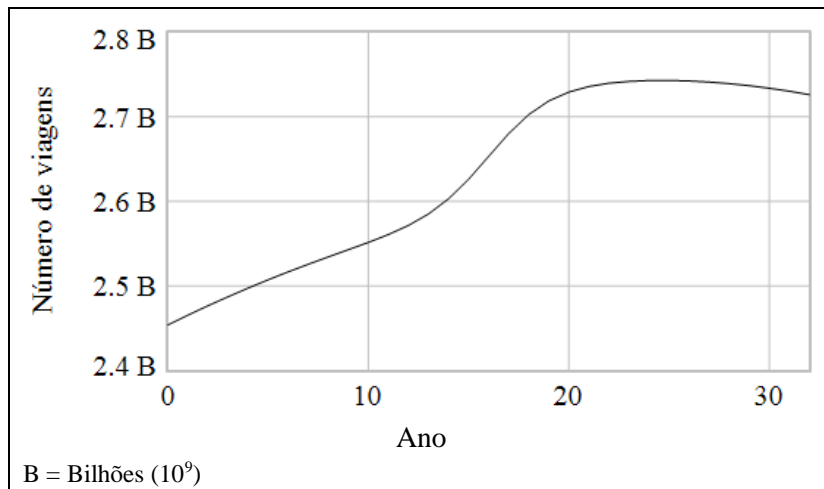


Figura 6.2 – Número de viagens com Transporte Público

Fonte: Elaborado pelo autor.

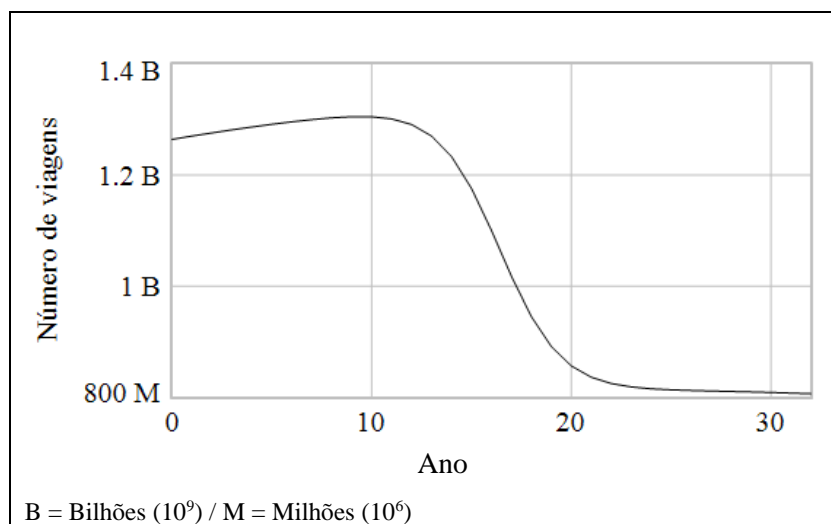


Figura 6.3 – Número de viagens com Transporte Individual

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme apresentado na descrição do estudo de caso, a cidade do Rio de Janeiro possui um elevado nível de congestionamento. O gráfico da Figura 6.4 mostra que no ano 0 o nível de congestionamento é de 1,438, ou seja, a distância total percorrida é 43,8% superior à capacidade do sistema, gerando o congestionamento. Esta variável apresenta um crescimento até o nono ano, atingindo um nível de 1,483. Após o ano 10 o nível de congestionamento começa a diminuir e, por isso, o mesmo é inferior a 1,00 a partir do ano 20. Portanto, observa-se que após 19 anos do início da implementação da PNMU o

problema do congestionamento do município começa a ser solucionado. Vale ressaltar que no ano 20 o nível de implementação da PNMU é de 61,3%.

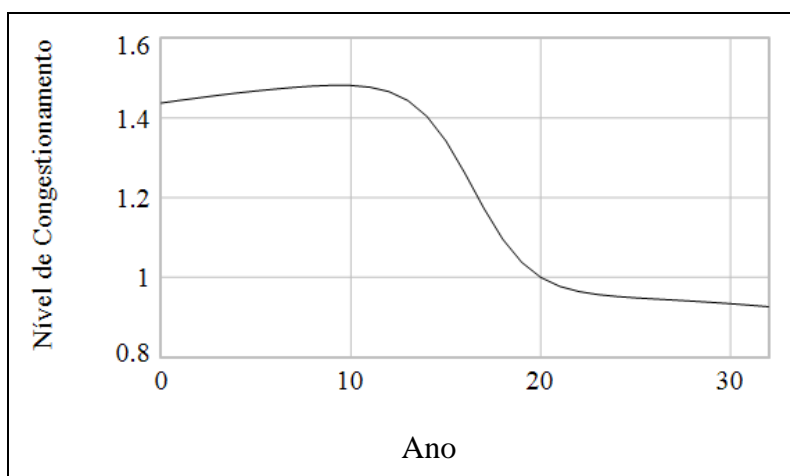


Figura 6.4 – Nível de Congestionamento

Fonte: Elaborado pelo autor.

O nível de congestionamento é superior a 1 nos primeiros 19 anos de simulação e, por isso, nesse período ocorre a solicitação do aumento no investimento destinado a infraestrutura de transporte. Devido ao *delay* de 10 anos, esses aumentos no investimento ocorrem entre os anos 10 e 29. Nota-se, também, que após a implementação de 100% da PNMU o nível de congestionamento atinge o valor de 0,92 no ano 32. Portanto, observa-se que, apesar do sistema não apresentar mais congestionamento, a demanda por transporte está bem próxima da capacidade do sistema. Vale ressaltar que ao afirmar que o sistema não apresenta mais congestionamento, considera-se que a média anual do nível de congestionamento é abaixo de 1,00. Entretanto, ainda pode existir picos de demanda durante o dia ou em épocas específicas, tornando o sistema congestionado. Esses possíveis picos de demanda temporários são dissolvidos em função do horizonte temporal de um ano.

Quanto à emissão de CO₂, observa-se uma redução na emissão de poluentes ao longo dos anos. Como não há saída da variável de estoque “Emissão total de CO₂”, esta variável cresce ao longo dos anos, resultando em um acúmulo de 49,66 milhões de toneladas de CO₂ em 32 anos, como pode ser visto na Figura 6.5(a).

Apesar deste acúmulo, nota-se uma alteração da inclinação da curva que representa esta variável. Ao analisar o acréscimo anual de CO₂, observa-se que ocorre um aumento de emissões nos primeiros anos de implementação da PNMU, porém este valor reduz a partir do 11º ano. Nos primeiros 10 anos a emissão de CO₂ cresce a uma taxa

média de 0,33% ao ano, variando de 1,83 milhões de toneladas no ano 0 para 1,89 milhões de toneladas no ano 10. Porém, entre o ano 11 e o ano 32, a taxa média de acréscimo de CO₂ é de -2,2%, resultando em um acréscimo de apenas 1,13 milhões de toneladas CO₂ no ano 32. Sendo assim, observa-se que mesmo o número total de viagens aumentando 5,24% em 32 anos, a emissão do ano 32 representa, aproximadamente, 60% das emissões do ano 0.

Vale ressaltar que o comportamento da curva do acréscimo anual de CO₂ (Figura 6.5(b)) a partir do ano 20 é justificado pela redução do congestionamento no sistema. Nos primeiros 19 anos o sistema apresenta um nível de congestionamento maior que 1,00 e, por isso, a quantidade de poluentes emitidos é multiplicada por 1,2.

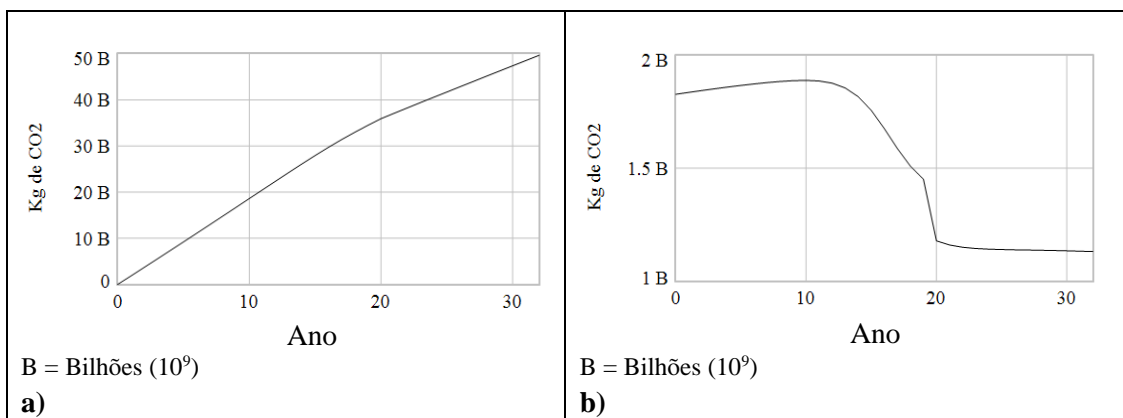


Figura 6.5 – Emissão total de CO₂ (a) e acréscimo anual de CO₂ (b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, verificou-se o impacto da implementação da PNMU nos indicadores “RTR” e “Área Coberta”. Como pode ser visto na Figura 6.6(a), o indicador *Rapid Transit to Resident* é de 63,29 Km de transporte de média de alta capacidade (TMAC) por milhão de habitantes no ano 0 e reduz a uma taxa média de 0,24% por ano, atingindo o valor de 60,03 no ano 22. Essa queda no indicador se justifica pelo aumento da população somada a ausência de investimentos para a ampliação da infraestrutura do trem, metrô e VLT. O crescimento deste indicador a partir do ano 23 se justifica pela redução da taxa crescimento na população a partir deste ano, como pode apresentado na Figura 6.1. Apesar da queda do indicador, a cidade do Rio de Janeiro apresenta valores superiores à média nacional. De acordo com Repogle e Fulton (2014), o RTR do Brasil é de 10,8 Km por milhão de habitantes e a projeção nacional para o ano de 2050 (ano 32) em um cenário de alta mudança é de 32,4 Km por milhão de habitantes.

Quanto ao indicador “Área Coberta”, nota-se na Figura 6.6(b) que no ano 0 existem 0,3448 Km TMAC para cada Km² da cidade do Rio de Janeiro. De maneira análoga ao RTR, este indicador reduz ao longo dos anos devido à falta de investimentos em transportes de média e alta capacidade e, por isso, o mesmo chega ao valor de 0,3371 Km por Km² no ano 32.

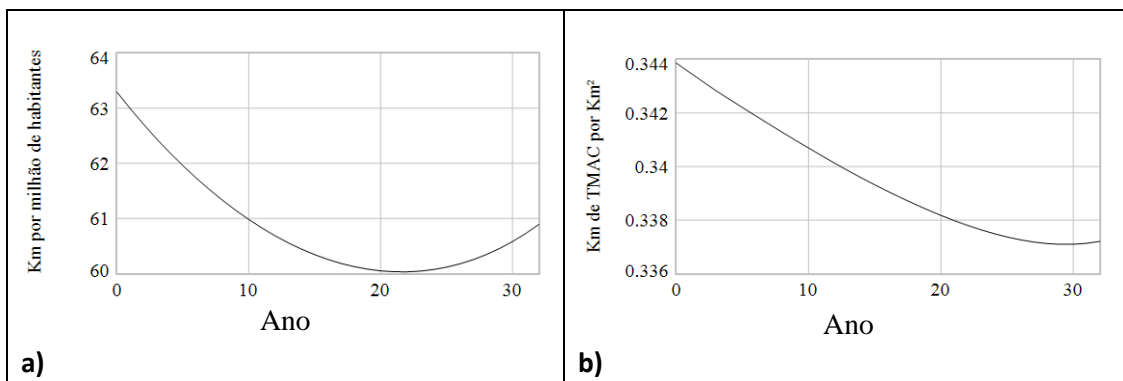


Figura 6.6 – RTR (a) e Área coberta (b) do Rio de Janeiro

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em suma, os resultados do cenário base evidenciam o impacto da implementação da PNMU nos sistemas de transporte. Entre os diversos benefícios, destacam-se a redução do nível de congestionamento e da emissão de poluentes. Além disso, os resultados deste cenário comprovam a importância do incentivo do transporte não motorizado e do transporte público em detrimento do transporte motorizado e do transporte individual, respectivamente.

6.4 Análise dos Resultados do Cenário 1

Este cenário buscou identificar o impacto da não implementação da PNMU. De acordo com o PDTU de 2015, entre os anos de 2003 e 2012 o percentual de viagens motorizadas cresceu a uma taxa de 0,90% por ano (Governo do Estado do Rio de Janeiro, 2015). Ainda de acordo o PDTU de 2015, a participação das viagens com transporte individual cresceu neste mesmo período a uma taxa de 1,11% ao ano. Analisando a atual divisão modal da cidade do Rio de Janeiro, onde 72% das viagens são realizadas por modos motorizados e desse total 34% são realizadas por transporte individual, nota-se que essas taxas médias de crescimento permaneceram entre os anos de 2012 e 2018.

Como pode ser visto na Figura 6.7, para a simulação do cenário sem implementação política, as variáveis “PNMU”, “Atratividade do Transporte não

Motorizado” e “Atratividade do Transporte Público” foram removidas do modelo. Essas variáveis foram substituídas pelas variáveis “% do Transporte Motorizado” e “% do Transporte Individual” que são definidas conforme as Equações (6.1) e (6.2), respectivamente.

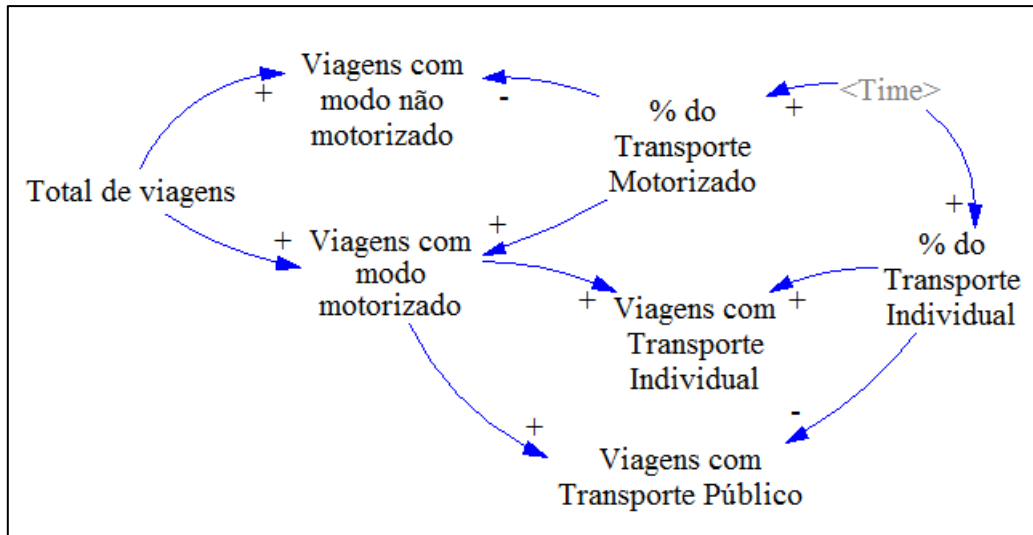


Figura 6.7 – Submodelo Demanda de Transporte sem implementação da PNMU
Fonte: Elaborado pelo autor.

$$\% \text{ do Transporte Motorizado} = 0,72 \times (1,009^{time}) \quad (6.1)$$

$$\% \text{ do Transporte Individual} = 0,34 \times (1,0111^{time}) \quad (6.2)$$

Assim, a quantidade de viagens realizadas por modos motorizados e não motorizados são definidas de acordo as Equações (6.3) e (6.4).

$$\begin{aligned} \text{Viagens com Motorizado} \\ = \text{Total de Viagens} \times \% \text{ do Transporte Motorizado} \end{aligned} \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Viagens com não Modo Motorizado} \\ = \text{Total de Viagens} \\ \times (1 - \% \text{ do Transporte Motorizado}) \end{aligned} \quad (6.4)$$

Após o cálculo do número de viagens motorizadas, a quantidade de viagens com o transporte individual e com o transporte público são definidas conforme as Equações (6.5) e (6.6).

Viagens com Transporte Individual

$$= \text{Viagens com Modo Motorizado} \quad (6.5)$$

$$\times \% \text{ do Transporte Individual}$$

Viagens com Transporte Público

$$= \text{Viagens com Modo Motorizado} \quad (6.6)$$

$$\times (1 - \% \text{ do Transporte Individual})$$

Ao simular este cenário por 32 anos, nota-se na Figura 6.8 que o nível de congestionamento quase duplica, passando de 1,44 no ano 0 para 2,72 no ano 32. Deste modo, fica evidente que, sem a implementação da PNMU, o atual sistema de transporte do Rio de Janeiro não possui capacidade para atender a demanda futura. Sendo assim, torna-se necessário a implementação imediata de medidas para evitar o caos no transporte urbano da cidade.

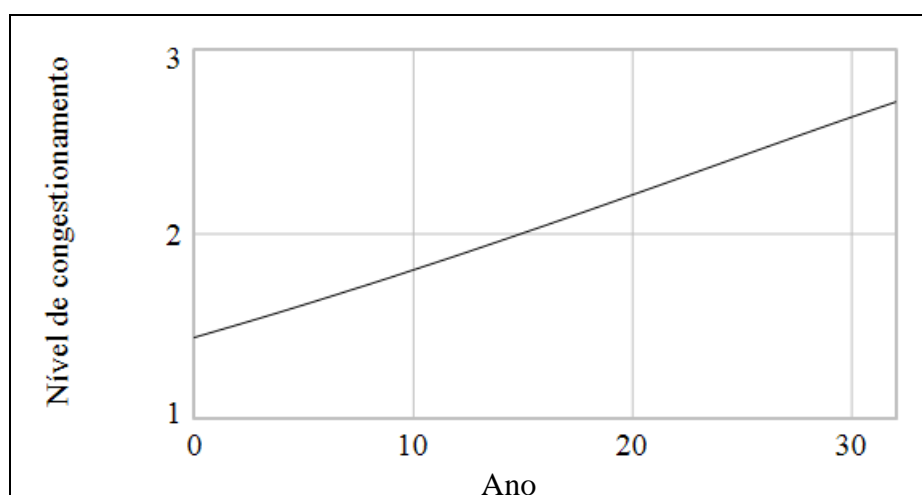


Figura 6.8 – Nível de congestionamento sem implementação da PNMU

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar o submodelo Meio Ambiente, nota-se o grande prejuízo ambiental causado pela não implementação da PNMU. Observa-se na Figura 6.9 que a emissão de CO₂ aumenta a uma taxa média anual de 1,85%, resultando em 3,28 milhões de toneladas de CO₂ emitidos no ano 32. Ao final dos 32 anos, o estoque de CO₂ equivale a 79,98 milhões de toneladas. Este valor é 1,6 vezes maior do que o estoque acumulado durante o mesmo período no Cenário Base (que considera a implementação da PNMU). Sendo assim, além de garantir um fluxo adequado de pessoas e cargas no espaço urbano, a PNMU é importante para a redução dos impactos do setor de transporte no meio ambiente.

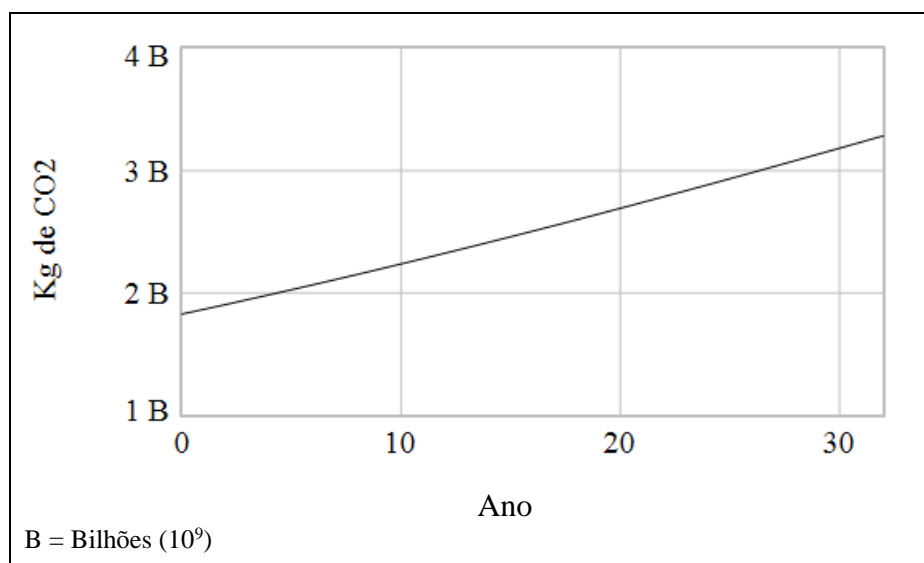


Figura 6.9 – Emissão anual de CO₂ sem implementação da PNMU
 Fonte: Elaborado pelo autor.

6.5 Análise dos Resultados do Cenário 2

As políticas de mobilidade urbana não só incentivam o transporte público como também a realização de viagens compartilhadas. Como pode ser visto na Figura 6.10, o Cenário 2 analisou o impacto gerado pelo aumento da taxa de ocupação dos veículos individuais para 2 e 3 pessoas.

Observa-se uma grande diferença no nível de congestionamento ao considerar uma média de duas pessoas por veículo. No ano 0, onde ainda não há implementação da PNMU, o nível de congestionamento fica abaixo de 1,00. Apesar deste valor aumentar nos primeiros anos, o nível de congestionamento permanece abaixo de 1,00 durante toda a simulação, chegando ao valor de 0,63 no ano 32.

Para o cenário com uma média de 3, nota-se também uma redução do congestionamento, porém em proporções menores do que a redução entre as simulações com 1,3 e 2 pessoas. Considerando três pessoas por veículo, o congestionamento no ano 0 e no ano 32 é de 0,67 e 0,45, respectivamente.

Vale ressaltar que, durante os 32 anos de simulação, o nível de congestionamento do Cenário Base (com 1,3 pessoas por veículo) é duas vezes maior do que o congestionamento no cenário com três pessoas por veículo. Devido a este impacto positivo, fica evidente a importância da implementação de estratégias da Gestão da Mobilidade como, por exemplo, as viagens compartilhadas (*Rideshare*).

No modelo proposto, a PNMU influencia diretamente apenas a atratividade do modo não motorizado e a atratividade do transporte público. Deste modo, nota-se a necessidade de a PNMU influenciar diretamente o número de pessoas por veículo de modo que este índice cresça ao longo dos anos, conforme o nível de implementação desta política.

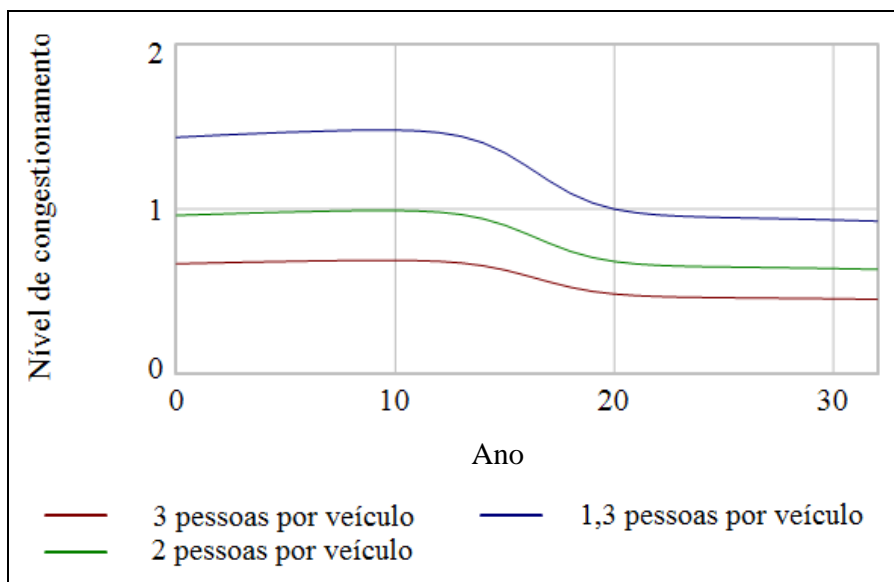


Figura 6.10 – Nível de congestionamento para diferentes ocupações médias de veículos
Fonte: Elaborado pelo autor.

6.6 Análise dos Resultados do Cenário 3

Ao verificar o impacto do atraso (*delay*) no aumento do investimento em transportes devido ao congestionamento, constata-se que o período de 10 anos, considerado no Cenário Base, não tem um impacto significativo no nível de congestionamento. Como pode ser visto no Quadro 6.1, a variação deste *delay* não altera significativamente o nível do congestionamento, pois esta mudança é perceptível apenas na casa de milésimos. No ano 10, por exemplo, o nível de congestionamento é de aproximadamente 1,482 independente do período adotado para o *delay*.

Este comportamento se justifica devido ao baixo investimento em infraestrutura de transportes. Conforme discutido no Capítulo 5, apenas 0,002% do PIB da cidade do Rio de Janeiro é destinado à construção/implantação de novas vias. Sendo assim, um aumento de 10% neste valor não gera um impacto significativo na variação da rede viária. Como este aumento de 10% foi um valor estimado inicialmente, buscou-se verificar o impacto do *delay* caso este aumento no investimento fosse de 50% e 100%. Os resultados apontam que, mesmo se o valor dos investimentos em transportes fosse duplicado, o nível

de congestionamento permaneceria o mesmo. Deste modo, observa-se a necessidade de o município aumentar os investimentos em infraestrutura para resolver os elevados níveis de congestionamento.

Quadro 6.1 – Níveis de congestionamento para diferentes *delays* no aumento do investimento em transporte

<i>Delay</i> \ Ano	Ano 10	Ano 15	Ano 20	Ano 32
<i>Delay</i> = 0	1,48198	1,34246	0,99969	0,927399
<i>Delay</i> = 1 ano	1,48198	1,34246	0,99969	0,927399
<i>Delay</i> = 2 anos	1,48201	1,34248	0,99971	0,927294
<i>Delay</i> = 3 anos	1,48204	1,34251	0,999732	0,927179
<i>Delay</i> = 4 anos	1,48208	1,34255	0,999757	0,927052
<i>Delay</i> = 5 anos	1,48212	1,34258	0,999784	0,926912
<i>Delay</i> = 7 anos	1,48221	1,34267	0,999846	0,92659
<i>Delay</i> = 10 anos	1,48221	1,34283	0,999964	0,92624
<i>Delay</i> = 15 anos	1,48221	1,34296	1,00025	0,926503
<i>Delay</i> = 20 anos	1,48221	1,34296	1,00041	0,926927

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.7 Análise dos Resultados do Cenário 4

O impacto da expansão da capacidade do sistema de transporte da cidade do Rio de Janeiro foi analisado no Cenário 4. Para isso, considerou-se igualitária a distribuição da verba destinada a infraestrutura em transportes para as vias urbanas, trilhos de metrô, de trem e de VLT. Deste modo, cada modo recebeu 25% dos investimentos.

Devido aos baixos investimentos em infraestrutura, a expansão do sistema de transporte do Rio de Janeiro é muito pequena. Ao analisar as Figuras 6.11(a), 6.11(b), 6.11 (c) e 6.11 (d), nota-se que o metrô é o modo com a menor expansão em 32 anos. Esta expansão é inferior a metade da distância entre as duas estações de metrô do Rio de Janeiro mais próximas entre si. Além do baixo investimento, este valor se justifica devido ao alto custo de implementação deste modo. Já o trem e VLT apresentam uma expansão de 4,6 Km e 4,9 Km, respectivamente.

Em 32 anos, a rede viária apresenta um crescimento de 82,3 Km, ou seja, 246,7 Km a menos do que o crescimento apresentado no Cenário Base. Esta redução ocorre por que no Cenário Base todo investimento em transporte é destinado a construção de novas vias e neste cenário o investimento é dividido com os outros modos.

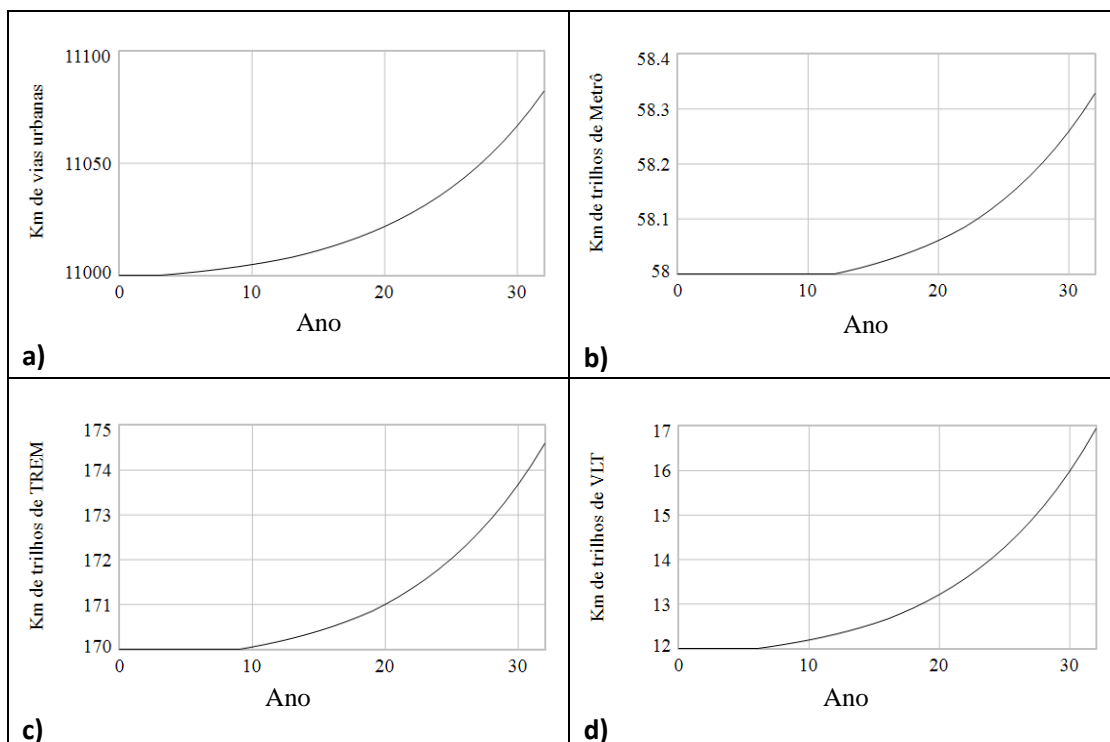


Figura 6.11 – Quilometragem total de vias urbanas (a), trilhos de metrô (b), trem (c) e VLT (d)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar de apresentar um comportamento similar ao Cenário Base, os indicadores de mobilidade urbana apresentam melhorias com a expansão dos modos sobre trilhos. De acordo com a Figura 6.12(a), o RTR subiu aproximadamente 1 Km por milhão de habitantes, atingindo 61,77 no ano 32. Já o indicador “Área Coberta” é de 0,3420 Km de TMAC para cada Km² no ano 32, como pode ser visto na Figura 6.12(b). Comparando com o Cenário Base, este valor representa um aumento de 1,4%. Além disso, o menor valor do indicador Área Coberta neste cenário (0,3395) ocorre no ano 25 e é maior do que o valor computado no ano 32 do Cenário Base (0,3372).

Vale ressaltar que os investimentos em infraestrutura são baixos e o crescimento do RTR e da Área Coberta a partir do ano 20 ocorrem devido a redução da taxa de crescimento populacional. Além disso, esse crescimento não é suficiente para que esses indicadores voltem a possuir valores iguais ao ano 0.

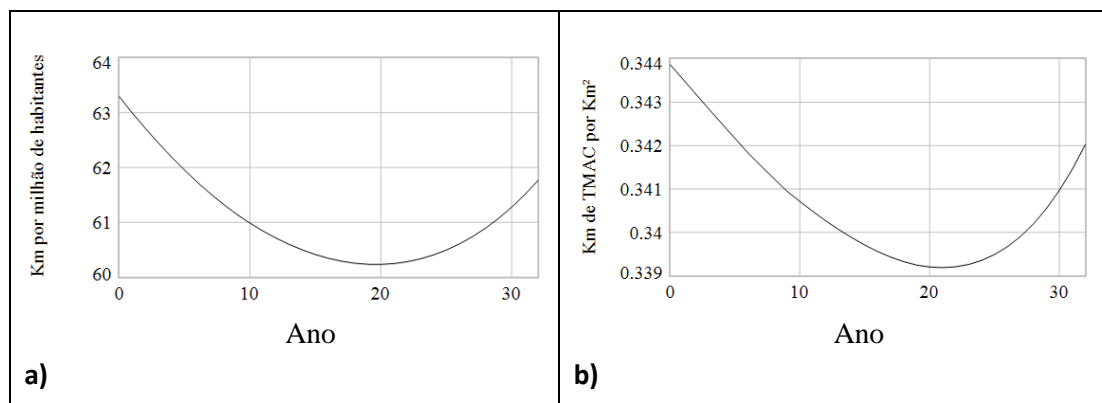


Figura 6.12 – RTR (a) e Área coberta (b) do Rio de Janeiro

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme discutido no Capítulo 5, apenas 2,2% da dotação orçamentária do setor de transportes é destinada infraestrutura urbana. Sendo assim, buscou-se verificar o impacto do aumento dessa taxa na capacidade do sistema de transporte. Considerando novamente uma divisão igualitária para as vias e os três modos sobre trilhos, foi simulado o impacto de 5%, 10%, 15%, 20 e 25% da verba do setor do transporte sendo destinado a infraestrutura urbana. Os resultados desse experimento são apresentados no Quadro 6.2 que expõe a capacidade do sistema no ano 0 e no ano 32 para diferentes níveis de investimentos em infraestrutura.

Quadro 6.2 – Quilometragem total de vias e de trilhos em Km para diferentes níveis de investimentos em infraestrutura

	Ano 0	Ano 32 (2,2%)	Ano 32 (5%)	Ano 32 (10%)	Ano 32 (15%)	Ano 32 (20%)	Ano 32 (25%)
Vias Urbanas	11.000	11.082,3	11.185,1	11.370,2	11.555,2	11.740,3	11.925,4
Metrô	58	58,33	58,74	59,48	60,21	60,96	61,7
Trem	170	174,6	180,3	190,7	201,0	211,4	221,7
VLT	18	16,94	23,11	34,23	45,34	56,46	67,58

Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figuras 6.13 e 6.14 apresentam o impacto desses diferentes níveis de investimento em infraestrutura nos indicadores de mobilidade urbana. Nota-se que se 15% do orçamento do setor de transporte for destinado a infraestrutura, o RTR será de 74,77 no ano 32, resultando em 13 quilômetros por milhão de habitantes a mais do que no Cenário Base. Para 5% e 25% esse indicador seria de 63,8 e 78,4, respectivamente.

Para o indicador “Área Coberta”, no ano 32 ele receberia 0,35, 0,37 e 0,39 quando o investimento em infraestrutura representa 5%, 10% e 15% do orçamento do setor de transporte, respectivamente. Além disso, observa-se que para um investimento de 25% do orçamento, este indicador recebe o valor de 0,43, ou seja, apresenta um crescimento de 27% quando comparado com o Cenário Base.

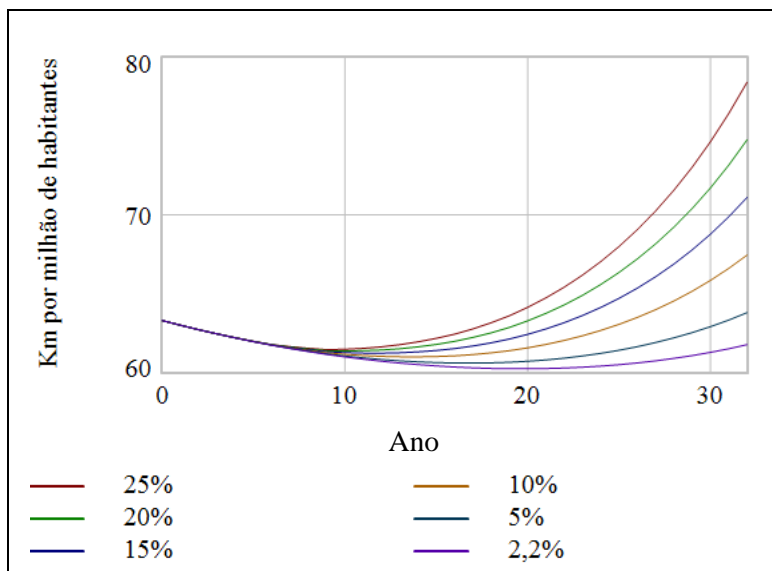


Figura 6.13 – RTR para diferentes níveis de investimento
Fonte: Elaborado pelo autor.

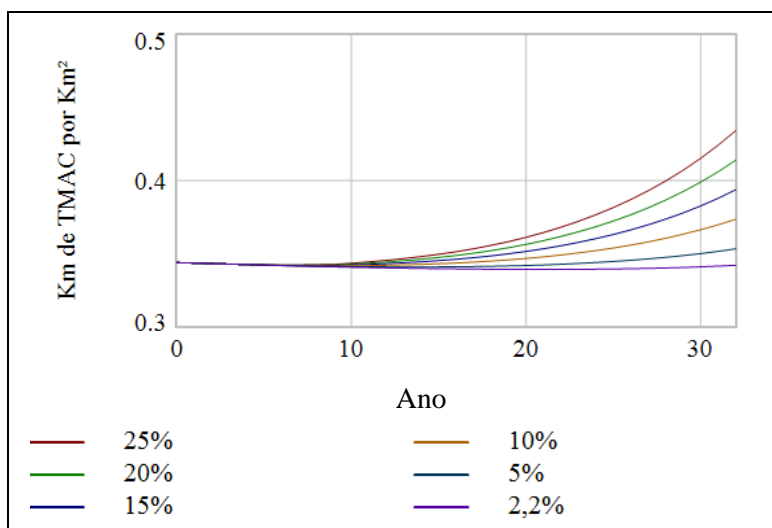


Figura 6.14 – Área Coberta para diferentes níveis de investimento
Fonte: Elaborado pelo autor.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Por meio da discussão apresentada neste trabalho foi possível compreender os objetivos e as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU). Além disso, verificou-se na revisão de literatura que existem vários modelos que utilizam a Dinâmica de Sistemas (DS) na análise da mobilidade urbana. Entretanto, nota-se que a maior parte desses modelos não consideram pontos fundamentais da PNMU como, por exemplo, os diferentes modos do transporte público.

Dessa forma, este trabalho buscou avaliar o impacto da PNMU em sistemas socioeconômicos de transporte. Para tanto, foi utilizado o método da DS, o qual permitiu simular a influência desta política e mensurar o seu impacto sobre as variáveis de interesse.

Os resultados da simulação do modelo proposto apontam a importância da implementação da PNMU para reduzir os efeitos negativos do transporte e, também, para aumentar a eficiência dos sistemas de transporte. No Cenário Base, observa-se que, apesar do crescimento populacional e do desenvolvimento econômico, o incentivo ao uso do transporte não motorizado e do transporte público reduz o nível de congestionamento e a emissão de poluentes.

No Cenário 1, buscou-se verificar o comportamento do sistema de transporte sem a implementação da PNMU. Considerando as taxas atuais de crescimento do transporte motorizado e do transporte individual, observa-se que em 32 anos o nível de congestionamento e as emissões de CO₂ dobrarão. Deste modo, fica evidente que a continuidade do atual padrão de viagens aumentará as externalidades negativas do transporte, resultando em um sistema insustentável. Portanto, levando em consideração o Cenário Base, o Cenário 1 evidencia a importância da implementação da PNMU para que se obtenha um sistema de transporte que atenda a demanda de maneira sustentável.

O Cenário 2 analisou o impacto de uma estratégia da TDM baseada na melhoria das opções de transporte. Verificou-se que um número médio de duas pessoas por veículo resultaria em redução de, aproximadamente, 30% no nível de congestionamento ainda no ano 0. Sendo assim, os resultados deste cenário mostram como as viagens compartilhadas (*Rideshare*) são importantes para a redução do congestionamento e, conseqüentemente, o aumento da eficiência do sistema de transporte. Além disso, é importante que as medidas da PNMU estejam atreladas a medidas de outras políticas como, por exemplo, a

de redução de IPI para carros e o estímulo a utilização de veículos híbridos. Caso contrário, a implementação de tais medidas pode ficar comprometida.

Ao analisar a influência do atraso (*delay*) no aumento do investimento em transportes devido o congestionamento, constatou-se no Cenário 3 que este *delay* não tem um impacto significativo no nível de congestionamento. Este resultado é reflexo do baixo investimento em infraestrutura de transportes na cidade do Rio de Janeiro. Além disso, nota-se que, devido ao seu baixo valor, um aumento calculado sob o atual investimento em infraestrutura não gera mudanças significativas no nível de congestionamento.

Por fim, como foi considerado no Cenário Base que não há planos de expansão dos modos sobre trilhos no Rio de Janeiro, o Cenário 4 verificou o impacto da expansão desses modos. Assim como no Cenário 3, devido ao baixo investimento em infraestrutura, não houveram mudanças significativas no sistema analisado. Entretanto, ao simular este cenário com um maior investimento em infraestrutura, nota-se que a expansão da capacidade desses modos impacta positivamente nos indicadores de mobilidade urbana.

Com relação as limitações, esta pesquisa apresentou algumas restrições quanto a obtenção dos valores de algumas variáveis. Não foi encontrado na literatura valores da Distância percorrida por Km de via (*VKT per lane*) para o Brasil e, por isso, foi utilizado um valor referente ao sistema de transporte norte americano. Além disso, não foi encontrado na literatura estudos que estipulem um tempo médio de implementação de novas vias (considerando o planejamento, licitação e construção) e também o *delay* entre a constatação do sistema congestionado e o aumento efetivo do investimento em transportes. Quanto aos modos de transporte público, este estudo não aborda os modos vans e barcas que juntos representam, aproximadamente, 4,1% dos deslocamentos no Rio de Janeiro.

Além das limitações relacionadas a obtenção de parâmetros, o modelo proposto não aborda pontos importantes da PNMU como o uso do solo e os fatores sociais. Além disso, a estrutura proposta analisa o impacto das viagens realizadas pela população do Rio de Janeiro, mas não considera a demanda de transporte proveniente da população de outros municípios da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Por fim, vale ressaltar que o modelo não distingue as viagens realizadas por ônibus convencionais das viagens realizadas por ônibus em sistema BRT. O sistema BRT é considerado no cálculo da rede de transporte de média e alta capacidade, porém está associado ao serviço de ônibus convencional no submodelo Transporte Público. Entretanto, apesar das limitações mencionadas, o objetivo deste trabalho foi alcançado.

Como sugestões para trabalhos futuros, acredita-se que o modelo de apoio a decisão proposto nesse estudo pode ser ampliado. Sugere-se que o modelo aborde pontos fundamentais da PNMU como, por exemplo, os fatores sociais (política tarifária, acidentes de trânsito, entre outros), o uso do solo e o redesenho da cidade. Outra sugestão consiste em estudar políticas públicas que incentivem que um maior número de pessoas utilize os veículos privados, para que as taxas médias de ocupação sejam superiores a 2 pessoas por automóvel, de acordo com o nível de implantação da PNMU.

O modelo de DS proposto utiliza parâmetros externos para a realização da divisão modal entre os transportes públicos. Sendo assim, observa-se a necessidade de inserir um método para que o modelo realize esta divisão. Sugere-se também que o nível de implementação da PNMU seja considerado neste cálculo. Ainda no submodelo Transporte Público, sugere-se também a inserção de veículos elétricos na matriz de transporte.

Na estrutura proposta, considerou-se como expansão da oferta de transporte a construção de infraestrutura. Entretanto, existem outros modos de expansão da capacidade para os modos sobre trilhos (trem, metrô e VLT) sem a necessidade da expansão da infraestrutura. Portanto, sugere-se que trabalhos futuros abordem outras formas de investimentos para expansão da capacidade do sistema.

Assim, nota-se que o presente trabalho contribui para a literatura de modo a complementar os estudos existentes sobre a temática. Além disso, o modelo proposto pode ser aplicado em outros municípios, permitindo a análise do impacto de estratégias de mobilidade urbana em outros sistemas socioeconômicos de transporte. Portanto, este estudo colabora para o planejamento das cidades, permitindo, por meio de um modelo de apoio a decisão, analisar o impacto de diferentes medidas (isoladas ou em conjunto) nos sistemas de transporte urbano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBAS, K. A., BELL, M. H., 1994, "System Dynamics Applicability to Transportation Modeling", *Transportation Research Part A*, v. 28, n. 5, pp. 373-400.
- ABIDIN, N. Z., MAMAT, M., DANGERFIELD, B., ZULKEPLI, J. H., BATEN, M. A., WIBOWO, A., 2014, "Combating Obesity through Healthy Eating Behavior: A Call for System Dynamics Optimization", *PloS One*, v. 9, n. 12, pp. 114-135.
- ACHARYA, S. R., 2005, "Motorization and Urban Mobility in developing countries exploring policy options through dynamic simulation", *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, v. 6, [s. n.], pp. 4113-4128.
- AFFONSO, N. S., BRITO, J. M., CLOVIS, G., 2009, *Mobilidade Urbana e Inclusão Social*, Brasília, Instituto MDT.
- ALVES, P., 2014, "Mobilidade Urbana sustentável: diretrizes da política brasileira", *Cadernos Adenauer*, v. 15, n. 2, pp. 41-53.
- ALVES, R., 2017, "Panorama da Mobilidade Urbana: problemas e desafios", *Revista Ônibus*, n. 100. Disponível em: <<http://www.revistaonibus.com.br/materias/panorama-da-mobilidade-urbana-problemas-e-desafios/>>. Acesso em 10 jul. 2018.
- ANDRADE, C. E. S.; D'Agosto, M. A.; SOUZA, A. S. M., 2017, "A contribuição ambiental proporcionada pelas operações de sistemas metroferroviários de passageiros, visando à redução das emissões totais de CO₂ do setor de transportes de uma região: Aplicação nos sistemas do Rio de Janeiro – Metrô e SuperVia". In: *Anais da 23ª Semana de Tecnologia Metroferroviária*, São Paulo.
- ANFAVEA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DOS VEÍCULOS AUTOMOTORES, 2019, "Estatísticas". Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/estatisticas.html>>. Acesso em: 7 fev. 2019.
- ANGARITA-ZAPATA, J. S., PARRA-VALENCIA, J. A., ANDRADE-SOSA, H. H., 2016, "Understanding the Structural Complexity of Induced Travel Demand in Decision-Making: A System Dynamics Approach", *Organizacija*, v. 49, n.3, pp. 129-144.
- ANTP – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS, 2015, "Sistema de Informações da Mobilidade Urbana: Relatório Geral 2013". Disponível em: <[97](http://files-</p></div><div data-bbox=)

- server.antp.org.br/_5dotSystem/userFiles/SIMOB/Rel2013V3.pdf>. Acesso em: 16 out. 2018.
- ANTP – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS, 2016, "Sistema de Informações da Mobilidade Urbana: Relatório Geral 2014". Disponível em: <http://files.antp.org.br/2016/9/3/sistemasinformacao-mobilidade--geral_2014.pdf>. Acesso em: 16 out. 2018.
- ARMAH, F. A., YAWSON, D. O., PAPPOE, A. A. N. M., 2010, "A Systems Dynamics Approach to Explore Traffic Congestion and Air Pollution Link in the City of Accra, Ghana", *Sustainability*, v. 2, [s. n.], pp. 252-265.
- AZHAGINIYAL, A., UMADEVI, G., 2014, "System Dynamics Simulation Modeling of Transport, Energy and Emissions Interactions", *Civil Engineering and Architecture*, v. 2, n. 4, pp. 149-165.
- BANISTER, D., 2008, "The sustainable mobility paradigm", *Transport Policy*, v. 15, n. 2, pp. 73-80.
- BARLAS, Y., 1996, "Formal aspects of model validity and validation in systems dynamics", *Systems Dynamics Review*, v. 12, n. 3, pp. 183-210.
- BATUR, I., KOÇ, M., 2017, "A Review of System Dynamics Applications ins Sustainable Urban Transportation". In: *The European Conference on Sustainability, Energy & the Environment*, pp. 1-11, Brighton, UK, ECSEE.
- BEDADALA, S., MALLIKARJUNA, C., 2016, "Factors Influencing Non-Motorized Mode Choice: A Review". *International Journal for Research in Applied Science & Engineering*, v. 4, n.2, pp. 27-33.
- BÉHAR, A. H., DOURADO, D. C. P., 2015, "Programa Estadual de Mobilidade Urbana do Governo do Estado de Pernambuco (PROMOB): políticas públicas inovadoras ou repetição das práticas realizadas no passado?", *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 7, n. 3, pp. 354-367.
- BERNARDINO, J. P. R., HOOFD, M. V. D., 2013, "Parking Policy and Urban Mobility Level of Service-System Dynamics as a Modelling Tool for Decision Making", *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, v. 13, n. 3, pp. 239-258.
- BICUDO, P. M., 2008, *O direito de construir perante a função social da propriedade urbana*. 162 f. Dissertação (Mestrado em Direito com ênfase em Direito do Estado), Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo.

- BOARETO, R., 2008, “A política de mobilidade urbana e a construção de cidades sustentáveis”, *Revista dos Transportes Públicos ANTP*, v. 30/31, [s. n.], pp. 143-160.
- BRASIL. Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. *Estatuto da Cidade e Legislação Correlata*, Brasília: Senado Federal, 2001. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/110257.htm>. Acesso em: 2 mai. 2018.
- BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2004a, *Política Nacional de Desenvolvimento Urbano*, Brasília: Cadernos MCidades nº 1, Ministério das Cidades.
- BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2004b, *Política Nacional de Mobilidade Urbana Sustentável*, Brasília: Cadernos MCidades nº 6, Ministério das Cidades.
- BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2005, *Mobilidade e Política Urbana: Subsídios para uma Gestão Integrada*, Coordenação: Lia Bergman e Nidia Inês Albesa de Rabi, Rio de Janeiro: IBAM, Ministério das Cidades.
- BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2007, Secretaria Nacional de Transportes e da Mobilidade Urbana. *PlanMob: Construindo a cidade sustentável*. Brasília: Caderno de Referência para Elaboração de Plano de Mobilidade Urbana, Ministério das Cidades
- BRASIL. Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana, *Diário Oficial da União*, Brasília, 2012.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO TURISMO, 2013, *Mais turismo, mais desenvolvimento: Indicadores*. Disponível em: <http://www.turismo.gov.br/sites/default/turismo/noticias/todas_noticias/Noticias_download/Cartilha_Mais_Turismo_mais_desenvolvimento_2013.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2018.
- BRASIL. MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, PORTOS E AVIAÇÃO CIVIL, 2014, *1ª Palestra Técnica – DERIN: VLT - Veículo Leves sobre Trilhos*. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/component/content/article/2-uncategorised/2833-1-palestra-tecnica-derin.html>>. Acesso em: 27 jun. 2018.
- BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2015a. *Institucional*, Brasília: Senado Federal. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/institucional>>. Acesso em: 2 mai. 2018.

- BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2015b, Secretaria Nacional de Transportes e da Mobilidade Urbana. *PlanMob*. Brasília: Caderno de Referência para Elaboração de Plano de Mobilidade Urbana, Ministério das Cidades.
- BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2015c, *Os desafios da mobilidade urbana*. Relator: Ronaldo Benedet, Consultores legislativos: Antônia Maria de Fátima Oliveira (coord.) ... [et al.] Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 352p.
- BRASIL. SENADO FEDERAL, 2016, [Constituição (1988)], *Constituição da República Federativa do Brasil*: texto constitucional promulgado em 5 de outubro de 1988, com as alterações determinadas pelas Emendas Constitucionais de Revisão nºs 1 a 6/94, pelas Emendas Constitucionais nºs 1/92 a 91/2016 e pelo Decreto Legislativo nº 186/2008, Brasília: Senado Federal, Coordenação de Edições Técnicas, 496 p.
- BRASIL. MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, PORTOS E AVIAÇÃO CIVIL, 2018, *Avaliação das Políticas Públicas de Transportes: Segurança nas Rodovias Federais*. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/component/content/article/113-politica-e-planejamento-de-transportes/7385-apt.html>>. Acesso em: 27 nov. 2018.
- BRTRIO, 2018, *Conheça o BRT*. Disponível em: <<http://brtrio.com/>>. Acesso em: 4 jul. 2018.
- BUENO, N. P., 2014, “Misperceptions of feedbacks and the resilience of common-pool resources systems: a discussion for irrigation systems based on loop dominance analysis”. *International Journal of the Commons*, v. 8, n.1, pp. 79-106.
- BUREAU OF TRANSPORTATION STATISTICS, 2017, “Table 1-36M: Roadway Vehicle-Kilometers Traveled (VKT) and VKT per Lane-Kilometers by Functional Class(a)”. Disponível em: <https://www.bts.gov/archive/publications/national_transportation_statistics/table_01_36_m>. Acesso em: 10 set. 2018.
- CARVALHO, C. H. R., 2011, *Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros*. Brasília Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA.
- CAU/BR – Conselho de Arquitetura e Urbanismo do Brasil, 2014, *As maiores cidades da América*. Disponível em: <<http://arquiteturaurbanismotodos.org.br/as-maiores-cidades-da-america-latina/>>. Acesso em: 6 jun. 2018.
- CHAIM, R. M., 2009, *Modelagem, Simulação e Dinâmica de Sistemas*. Brasília, UNB.

- CHAERUL, M., TANAKA, M., SHEKDAR, A., 2008, “A system dynamics approach for a hospital waste management”, *Waste Management*, v. 28, n. 2, pp. 442-449.
- CHEN, M., HO, T., JAN, C., 2006, “A System Dynamics Model of Sustainable Urban Development: Assessing Air Purification Policies at Taipei City”, *Asian Pacific Planning Review*, v. 4, n. 1, pp. 29-52.
- CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE; NTU – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS, 2017, *Pesquisa Mobilidade da População Urbana 2017*. Brasília: CNT: NTU, 96 p.
- CÔRTEZ, C., 2018, *VLT, o queridinho dos cariocas*, *Jornal do Brasil*. Disponível em: <<http://www.jb.com.br/rio/noticias/2018/05/07/vlt-o-queridinho-dos-cariocas/>>. Acesso em: 8 jul. 2018.
- COSTA, M. S., 2008, *Um Índice de Mobilidade Urbana Sustentável*. 248 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- COSTA, R. G., SILVA, C. G. T., COHEN, S. C., 2013, "A origem do caos – a crise de mobilidade no Rio de Janeiro e a ameaça à saúde urbana", *Cadernos Metrópole*, v. 15, n. 30, pp. 411-431.
- COYLE, R. G., 1996, *System Dynamics modelling a practical approach*. Boca Raton, FL, EUA, CRC Press.
- COYLE, G., EXELBY, D., 2000, “The validation of commercial system dynamics models”, *System Dynamics Review*, v. 16, n. 1, p. 27-41.
- DI SARNO, D. C. L., 2004, *Elementos de direito urbanístico*. Barueri, Manole.
- DINIZ, C. C., VIEIRA, D. J., 2016, “Brazil: accelerated metropolization and urban crisis”, *Area Development and Policy*, v. 1, n. 2, p. 155-177.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT, 2017, *Custo Médio Gerencial*. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/custos-e-pagamentos/copy_of_custo-medio-gerencial>. Acesso em: 28 ago. 2018.
- DRUMM, F. C., GERHARDT, A. E., FERNANDES, G. D., CHAGAS, P., SUCOLOTTI, M. S., KEMERICH, P. D. da C., 2014, “Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis do petróleo em veículos automotores”, *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 18, n. 1, p. 66-78.

- DUNDOVIC, C., BILIC, M., DVORNIK, J., 2009, “Contribution to the Development of a Simulation Model for a Seaport in Specific Operating Conditions”, *Promet – Traffic&Transportation*, v. 21, [s.n.], p. 331-340.
- DVORNIK, J., MUNITIC, A., BILIC, M., 2006, “Simulation Modelling and Heuristics Optimization of Material Flow of the Port Cargo System”, *Promet-Traffic&Transportation*, v. 18, [s.n.], p. 123-135.
- ETTEMA, D., 2015, “Métodos de complexidade aplicados ao planejamento de transportes”, In Bernardo Alves Furtado, Patrícia A. M. Sakowski, Maria H. Tóvolli. *Modelagem de sistemas complexos para políticas públicas*, Brasília: IPEA.
- EUROMONITOR INTERNATIONAL, 2017, *Top 100 City Destination Ranking*. Londres, World Travel Market. Disponível em: <<http://go.euromonitor.com/World-Travel-Market-2017-Thank-You-2.html?aliId=167587736>>. Acesso em: 6 jun. 2018.
- EXPERT MARKET, 2018, *The Best and Worst Cities for Commuting*. Disponível em: <<https://www.expertmarket.co.uk/focus/best-and-worst-cities-for-commuting>>. Acesso em: 6 jul. 2018.
- FERNANDES, A. C., 2003, *Scorecard Dinâmico: em Direção à Integração da Dinâmica de Sistemas com o Balanced Scorecard*. 320 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- FETRANS – Federação das Empresas de Transportes de Passageiros do Ceará, Piauí e Maranhão, 2018, *BRT e VLT: Entenda as diferenças*. Disponível em: <<http://www.fetrans.org.br/site/?p=1238>>. Acesso em: 8 jul. 2018.
- FETRANSPOR – Federação das Empresas de Transportes de Passageiros do Estado do Rio de Janeiro, 2013, *Manual de Implementação BRS – Bus Rapid Service*. Disponível em: <http://www.fetranspordocs.com.br/downloads/03BRS-Manual_ANTP-20131002.pdf>. Acesso em: 4 jul. 2018.
- FETRANSPOR – Federação das Empresas de Transportes de Passageiros do Estado do Rio de Janeiro, 2018, *Mobilidade Urbana: Setor em números*. Disponível em: <<https://www.fetranspor.com.br/mobilidade-urbana-setor-em-numeros>>. Acesso em: 4 jul. 2018.
- FONTOURA, W. B., CHAVES, G. L. D., RIBEIRO, G. M., 2019, “The Brazilian Urban Mobility Policy: The Impact in São Paulo Transport System using System Dynamics”. *Transport Policy*, v. 73, [s.n.], pp. 51-61.

- FORRESTER, J. W., 1961, *Industrial Dynamics*, Cambridge, U.K., MIT Press.
- FORRESTER, J. W., 1994, "System dynamics, system thinking, and soft OR", *System Dynamics Review*, v. 10, n. 2-3, pp. 245-256.
- GAKENHEIMER, R., 1999, "Urban mobility in the developing world", *Transportation Research Part A*, v. 33, n. 7-8, pp. 671-689.
- GEORGIADIS, P., VLACHOS, D., 2004, "The effect of environmental parameters on product recovery", *European Journal of Operational Research*, v. 157, n. 2, pp. 449-464.
- GOVERNO DO RIO DE JANEIRO, 2015, *Plano Diretor de Transporte Urbano - PDTU*. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.rj.gov.br/web/setrans/exibeconteudo?article-id=626280>>. Acesso em: 4 jul. 2018.
- GOVERNO DO RIO DE JANEIRO, 2018, *Sistema de metrô do Rio*. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.rj.gov.br/web/setrans/exibeconteudo?article-id=222358>>. Acesso em: 4 jul. 2018.
- GROESSER, S. N., SCHWANINGER, M., 2012, "Contributions to model validation: hierarchy, process and cessation", *System Dynamics Review*, v. 28, n. 2, pp. 157-181.
- GUIMARÃES, V. P., 2007, Modelagem de uma Unidade de Produção para Caprinos Leiteiros Utilizando a Dinâmica de Sistemas. 182 f. Tese (Doutorado em Zootecnia), Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- HAGHSHENAS, H., VAZIRI, M., GHOLAMIALAM, A., 2015, "Evaluation of sustainable policy in urban transportation using system dynamics and world cities data: A case study in Isfahan", *Cities*, v. 45, [s. n.], pp. 104-115.
- HO, Y. L., 2015, "Application of a System Dynamics model to improve the performance of make-to-order production", *South African Journal of Industrial Engineering*, v. 26, n. 2, pp. 115-127.
- HOSSEINABAD, E. R., MORAGA, R. J., 2017, "A System Dynamics Approach in Air Pollution Mitigation of Metropolitan Areas with Sustainable Development Perspective: A Case Study of Mexico City", *Journal of Applied Environmental and Biological Science*, v. 7, n. 12, pp. 164-174.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 2008, *Projeção da População do Brasil por Sexo e Idade – 1980-2050*. Disponível em:

- <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv41229.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2019.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 2010, *Censo Demográfico 2010*. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br>>. Acesso em: 8 jun. 2018.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 2014, *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - 2014*. Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/trabalhoerendimento/pnad2014/default.shtm>>. Acesso em: 3 jul. 2018.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 2015, *Produto Interno Bruto dos Municípios*. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 8 jun. 2018.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 2017a, *Estimativas da população residente para os municípios e para as unidades da federação brasileiros com data de referência em 1º de Julho de 2017*. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv100923.pdf>>. Acesso em: 8 jun. 2018.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 2017b, *Cartografia*. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default_territ_area.shtm>. Acesso em: 8 jun. 2018.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 2018, *Projeção da População do Brasil e das Unidades de Federação*. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>>. Acesso em: 30 ago. 2018.
- INVEPAR, 2018, *METRÔNIO*. Disponível em: <<http://www.invepar.com.br/show.aspx?idMateria=DkbIADyFAEZGkX6rD5JXw==>>. Acesso em: 4 jul. 2018.
- ITDP – INSTITUTO DE POLÍTICAS DE TRANSPORTE & DESENVOLVIMENTO, 2016, *Indicadores de mobilidade urbana no Brasil*. Disponível em: <<http://itdpbrasil.org.br/indicadores/>>. Acesso em: 14 jul. 2018.

- ITDP – INSTITUTO DE POLÍTICAS DE TRANSPORTE & DESENVOLVIMENTO, 2018, “Banco de Dados”, *Mobilidados*. Disponível em: <<http://mobilidados.org.br/database>>. Acesso em: 14 jul. 2018.
- ITDP – INSTITUTO DE POLÍTICAS DE TRANSPORTE & DESENVOLVIMENTO; EMTU-SP – Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo, 2017, *Reflexões sobre Mobilidade Urbana Sustentável e Sistemas BRT*. Disponível em: <<https://go.itdp.org/>>. Acesso em: 24 jul. 2018.
- JIA, S., YAN, G., SHEN, A., ZHENG, J., 2017, "A System Dynamics Model for Determining the Traffic Congestion Charges and Subsidies", *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 42, n. 12, pp. 5291-5304.
- JIN, J., RAFFERTY, P., 2017, "Does congestion negatively affect income growth and employment growth? Empirical evidence from US metropolitan regions", *Transport Policy*, v. 55, [s. n.], pp. 1-8.
- JONES, P. M., 1987, “Mobility and the Individual in Western Industrial Society”. In: Nijkamp, P. e Reicheman, S. (ed.), *Transportation Planning in a Changing World*, capítulo 3, Aldershot, Inglaterra, Gower.
- JULIBONI, M., 2013, “As 15 maiores empresas da cidade do Rio de Janeiro”. *Revista Exame*. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/negocios/as-15-maiores-empresas-da-cidade-do-rio-de-janeiro/>>. Acesso em: 21 jun. 2018.
- KAYAL, P., SINGH, R., KUMAR, M., 2014, “Defining Sustainable Urban Mobility”, *The Energy and Resources Institute (TERI)*, n. 10, pp. 1-12. Disponível em: <<http://www.teriin.org/projects/nfa/2008-2013/pdf/working-paper-11-Defining-Sustainable-Urban-Mobility.pdf>>. Acesso em: 27 abr. 2018.
- KHANSARI, N., MOSTASHARI, A., MANSOURI, M., 2013, “Impacting Sustainable Behaviour and Planning in Smart City”, *International Journal of Sustainable Land Use and Urban Planning*, v. 1, n. 2, pp. 46-61.
- KNEIB, E. C., 2012, "Mobilidade Urbana e Qualidade de Vida: do panorama geral ao caso de Goiânia", *Revista UFG*, v. 3, n. 12, pp. 71-78.
- LERNER, W., 2011, *The Future of Urban Mobility: Towards Networked, Multimodal Cities of 2050*, Paris, França, Arthur D. Little.
- LI, K., ZHOU, S., YANG, X., 2013, "A System Dynamics Approach for Evaluating Policies on Prioritizing Public Transportation", *Applied Mechanics and Materials*, v. 391, [s.n.], pp. 628-632.

- LINS, I. B., SILVA, M. P., SILVA, A. C. C., FERREIRA, S. G., 2013, "*Projeção Populacional 2013-2020 para a Cidade do Rio de Janeiro: uma aplicação do método AiBi*", Rio de Janeiro: Instituto Pereira Passos. Disponível em: <<http://portalgeo.rio.rj.gov.br/estudoscariocas/ed13.asp>>. Acesso em: 30 ago. 2018.
- LITMAN, T., 2003, "Integrating Public Health Objectives in Transportation Decision-Making", *American Journal of Health Promotion*, v. 18, n.1, pp. 331-347.
- LITMAN, T., 2014, "The Mobility-Productivity Paradox: Exploring the negative relationships between mobility and economic productivity", *International Transportation Economic Development Conference*, Dallas, Texas, USA, 1-18.
- LITMAN, T., 2017, "*Evaluating Accessibility for Transport Planning*", Victoria, BC, Canadá, Victoria Transport Policy Institute - VTPI.
- LIU, S., TRIANTIS, K. P., SARANGI, S., 2010, "A framework for evaluating the dynamic impacts of a congestion pricing policy for a transportation socioeconomic system", *Transport Research Part A*, v. 44, n. 8, pp. 596-608.
- LIU, S., CHEN, S., LIANG, X., MAO, B., JIA, S., 2014, "Analysis of Transport Policy Effect on CO₂ Emissions Based on System Dynamics", *Advances in Mechanical Engineering*, v. 7, n. 1, pp. 1-8.
- LIU, X., SHOUFENG, M., TIAN, J., JIA, N., LI, G., 2015, "A system dynamics approach to scenario analysis for urban passenger transport energy consumption and CO₂ emissions: A case study of Beijing", *Energy Policy*, v. 85, n. 8, pp. 253-270.
- MACÁRIO, R., 2007, "What is strategy in Mobility Systems", *International Conference Series on Competition and Ownership in Land Passenger Transport*, Hamilton Island, Queensland, Austrália, pp. 1-20.
- MACHADO, L., PICCININI, L. S., 2018, "Os desafios para a efetividade da implementação dos planos de mobilidade urbana: uma revisão sistemática", *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 10, n. 1, pp. 72-94.
- MALEC, E., 2018, "The Benefits of Using Computer Simulation Models to Support Decision-Making". In: Hamrol A., Ciszak O., Legutko S., Jurczyk M. (eds.) *Advances in Manufacturing*, pp. 205-214, Cham, Suíça, Springer.
- MARQUES, R., 2017, "ITDP analisa o Plano Estratégico do Rio de Janeiro". *Instituto de Políticas de Transporte & Desenvolvimento – ITDP*. Disponível em: <<http://itdpbrasil.org/itdp-analisa-o-plano-estrategico-do-rio-de-janeiro/>>. Acesso em: 10 fev. 2019.

- MARTIS, M. S., 2006, "Validation of Simulation Based Models: A Theoretical Outlook", *The Electronic Journal of Business Research Methods*, v. 4, n. 1, pp. 39-46.
- MARX, R., MELLO, A. M., ZILBOVICIUS, M., LARA, F. F., 2015, "Spatial contexts an firm strategies: applying the multilevel perspective to sustainable urban mobility transitions in Brazil", *Journal of Cleaner Production*, v. 108, n. 1, pp. 1092-1104.
- MEADOWS, D. H., 2008, *Thinking in Systems*. Londres, Earthscan.
- MELLO, A., PORTUGAL, S. L., 2017, "Um procedimento baseado na acessibilidade para a concepção de Planos Estratégicos de Mobilidade Urbana: o caso do Brasil", *Eure (Santiago)*, v. 43, n. 128, pp. 99-115.
- MENDES, F. S., CEROY, F. M., 2015, "*Economia Compartilhada e a Política Nacional de Mobilidade Urbana*", Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado. Disponível em: <<http://www.senado.leg.br/estudos>>. Acesso em: 8 mai. 2018.
- MENEZES, E., MAIA, A. G., CARVALHO, C. S., 2017, "Effectiveness of low-carbon development strategies: Evaluation of policy scenarios for the urban transport sector in a Brazilian megacity", *Technological Forecasting and Social Change*, v. 114, [s. n.], pp. 226-241.
- MERCEDES-BENZ, 2018, "BRT Solutions". Disponível em: <https://www.mercedes-benz-bus.com/de_DE/buy/bus-rapid-transit.html>. Acesso em 10 out. 2018.
- METRÔRIO, 2014, *Sobre o MetrôRio*. Disponível em: <<https://www.metrorio.com.br/Empresa/Sobre>>. Acesso em: 4 jul. 2018.
- MILARÉ, E., 2016, "Política Nacional de Mobilidade Urbana", *Revista Jurídica da Universidade do Sul de Santa Catarina*, v. 7, n. 12, pp. 59-67.
- MOTTA, R. A., SILVA, P. C. M., SANTOS, M. P. S., 2013, "Crisis of public transport by bus in developing countries: A case study from Brazil", *International Journal of Sustainable Development and Planning*, v. 8, n. 3, p. 348-361.
- MUPFUMIRA, P., WIRJODIRDJO, B., 2015, "An Economically Sustainable Urban Public Transport Framework: System Dynamics Modelling Approach to Reduce Public Transport Liberalisation Impact in Harare City", *International Journal of Science, Technology and Society*, v. 3, n. 2, pp. 11-21.
- MUSSELWHITE, C., HADDAD, H., 2010, "Mobility, accessibility and quality of later life", *Quality in Ageing and Older*, v. 11, n. 1, pp. 25-37.

- NG, T. S., SY, C. L., LEE, L. H., 2012, "Robust parameter design for system dynamics models: a formal approach based on goal-seeking behavior", *System Dynamics Review*, v. 28, n. 3, pp. 230-254.
- OECD – THE ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, 2015, "ITF Transport Outlook 2015", *OECD Publishing/ITF*. Disponível em: <http://www.oecd-ilibrary.org/transport/itf-transport-outlook-2015_9789282107782-en>. Acesso em: 04 jul. 2018.
- OICA – ORGANISATION INTERNATIONALE DES CONSTRUCTEURS D'AUTOMOBILES, 2018, *2017 Production Statistics*. Disponível em: <<http://www.oica.net/category/production-statistics/2017-statistics/>>. Acesso em: 17 jul. 2018.
- OLIVEIRA JÚNIOR, J. A., 2012, "Princípios, Diretrizes e Objetivos da Lei N° 12.587/2012: Por um pacto social em prol da mobilidade urbana", *Revista UFG*, v. 13, n. 12, pp. 18-27.
- OLADOKUN, M. G., AIGBAVBOA, C. O., 2018, *Simulation-Based Analysis of Energy and Carbon Emissions in the Housing Sector: A System Dynamics Approach*. Cham, Suíça, Springer.
- PERKINS+WILL, 2018, "Designing for Future Mobility: Developing a Framework for the Livable Future City". Disponível em: <https://ca.perkinswill.com/sites/default/files/Designing_for_Future_Mobility_Report.pdf>. Acesso em 10 out. 2018.
- PFAFFENBICHLER, P., EMBERGER, G., SHEPHERD, S., 2010, "A system dynamics approach to land use transport interaction modelling: the strategic model MARS and its application", *System Dynamics Review*, v. 26, n. 3, pp. 262-282.
- PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO, 2009, *Características Geográficas*. Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/web/riotur/caracteristicas-geograficas>>. Acesso em: 12 jun. 2018.
- PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO, 2014, *Plano de Mobilidade Urbana Sustentável da Cidade do Rio de Janeiro*. Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/web/pmus>>. Acesso em: 2 jul. 2018.
- PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO, 2016a, *O Rio do amanhã: Visão Rio 500 e Planejamento Estratégico 2017-2020*. Disponível em: <<http://prefeitura.rio/web/planejamento/conheca-o-plano>>. Acesso em: 8 jul. 2018.

- PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO, 2016b, *Relatório do desempenho da prefeitura da cidade do Rio de Janeiro frente à Lei de Responsabilidade Fiscal*. Disponível em:
<<http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/2973689/4190101/RelatoriodeAudienciaPublica27042017.pdf>>. Acesso em: 6 ago. 2018.
- PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO, 2016c, *Prestação de Contas 2016*. Disponível em:
<<http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/1521865/4188801/LivroOficialdaPC2016.pdf>>. Acesso em: 6 nov. 2018.
- PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO, 2017, *Rio Conecta*. Disponível em:
<<http://www.rio.rj.gov.br/web/smu/exibeconteudo?id=7301546>>. Acesso em: 2 jul. 2018.
- PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO, 2018a, *Regiões Administrativas*. Disponível em:
<<http://www.rio.rj.gov.br/web/cvl/ra>>. Acesso em: 12 jun. 2018.
- PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO, 2018b, *Movimento de passageiros segundo os transportes rodoviário, ferroviário, hidroviário e aeroviário no Município do Rio de Janeiro entre 1995-2017*. Disponível em:
<http://www.data.rio/datasets?group_ids=cbe84df2333a463b9d4e20aca5177936&sort=-updatedAt&utm_source=transporte>. Acesso em: 28 ago. 2018.
- PINTO, V. C., 2014, *Direito Urbanístico: Plano Diretor e Direito de Propriedade*, 4. ed., São Paulo, Revista dos Tribunais.
- PORTUGAL, L. S., [et al.], 2017, *Transporte, Mobilidade e Desenvolvimento Urbano*, 1. ed., Rio de Janeiro, Elsevier.
- RASSAFI, A. A., MAHDI, O. J., JAVANSHIR, H., 2014, "An Appraisal of Sustainable Urban Transportation: Application of a System Dynamics Model", *International Journal of Transportation Engineering*, v. 2, n. 1, pp. 47-66.
- RAUX, C., 2003, "A system dynamics model for the urban travel system". In: *European Transport Conference*, pp. 1-21, Estrasburgo, ETC.
- RAYDUGIN, Y., 2017, *Handbook of Research on Leveraging Risk and Uncertainties for Effective Project Management*. Canadá, Risk Services & Solutions Inc.
- REPLOGLE, M. A., FULTON, L. M., 2014, "A Global High Shift Scenario: Impacts and Potential for more Public Transport Walking, and Cycling with Lower Car Use". *Instituto de Políticas de Transporte & Desenvolvimento – ITDP*. Disponível em:

- <https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2014/09/A-Global-High-Shift-Scenario_WEB.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2018.
- RESENDE, P. T. V., SOUZA, P. R., 2009, *Mobilidade Urbana nas Grandes Cidades*. Nova Lima, Minas Gerais, Fundação Dom Cabral.
- RICHARDSON, G. P., PUGH, A. L., 1989, *Introduction to System Dynamics Modeling*. Waltham, MA, USA, Pegasus Communications.
- RICHMOND, B., 2001, *An Introduction to Systems Thinking, STELLA*. 3ª ed. Lebanon, NH, USA, High Performance Systems, Inc.
- RIO ÔNIBUS – SINDICATO DAS EMPRESAS DE ÔNIBUS DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO, 2016, *Rio Ônibus*. Disponível em: <<http://www.rioonibus.com/rioonibus/>>. Acesso em: 4 jul. 2018.
- RODRIGUE, J. P., 2017, *The Geography of Transport Systems*. 4 ed. New York, USA, Routledge.
- RODRIGUES, J. M., 2013, "Transformações urbanas e crise de mobilidade urbana no Brasil: hipóteses sobre o caso do Rio de Janeiro no contexto dos megaeventos", *e-metropolis*, v. 4, n. 14, pp. 38-51.
- RODRIGUES, J. M., 2016a, "Qual o estado da mobilidade urbana no Brasil?". In: DE PAULA, M. e D. D. BARTELT (Orgs.). *Mobilidade urbana no Brasil: desafios e alternativas*. Rio de Janeiro: Fundação Heinrich Böll.
- RODRIGUES, J. M., 2016b, "O estado da mobilidade urbana no Rio de Janeiro". In: DE PAULA, M. e D. D. BARTELT (Orgs.). *Mobilidade urbana no Brasil: desafios e alternativas*. Rio de Janeiro: Fundação Heinrich Böll.
- RODRIGUES JÚNIOR, J. C. M., VIEIRA, R. S., 2017, "Políticas públicas de transporte coletivo de passageiros: Segregação das mulheres em vagão exclusivo do metrô", *Revista de Direito Sociais e Políticas Públicas*, v. 3, n. 2, pp. 122-139.
- RUBIM, B., LEITÃO, S., 2013, "O Plano de Mobilidade Urbana e o future das cidades", *Estudos Avançados*, v. 27, n. 79, pp. 55-66.
- SANTOS, E. C., AGUIAR, E., 2013, "Transporte de Cargas em Áreas Urbanas", In: Caixeta Filho, J. V. e R. S. Martins (Coord). *Gestão Logística do Transporte de Cargas*, São Paulo: Atlas.
- SAYYADI, R., AWASTHI, A., 2017, "A system dynamics based simulation model to evaluate regulatory policies for sustainable transportation planning", *International Journal of Modelling and Simulation*, v. 37, n. 1, pp. 25-35.

- SEABRA, L. O., TACO, P. W. G., DOMINGUEZ, E. M., 2013, "Sustentabilidade em transportes: do conceito às políticas públicas de mobilidade urbana", *Revista dos Transportes Públicos - ANTP*, v. 35, n. 2, pp. 103-124.
- SHAH, Y., MANAUGH, K., BADAMI, M., EL-GENEIDY, A., 2013, "Diagnosing Transportation: Developing Key Performance Indicators to Access Urban Transportation Systems", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2357, n. 1, pp. 1-12.
- SILVA, S. C. A., 2009, *Mobilidade Urbana Sustentável – O Campus da UTAD*. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.
- SILVA, A. N. R., COSTA, M. S., MACEDO, M. H., 2008, "Multiple views of sustainable urban mobility: The case of Brazil", *Transport Policy*, v. 15, n. 6, pp. 350-360.
- SILVA, R. D. A., 2013, "A nova cidade brasileira? Oportunidades e desafios da Lei 12.587/2012 que institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana". In: *Congresso Brasileiro de Transporte e Trânsito*, pp. 1-8, Brasília, ANTP.
- SHEPHERD, S. P., 2014, "A review of system dynamics models applied in transportation", *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, v. 2, n. 2, pp. 83-105.
- SONG, J., LI, J., XU, H., 2013, "System Dynamics Model of Urban Car Ownership: A case study of Guangzhou". In: *International Conference on Transportation Engineering*, pp. 3106-3111, Chengdu, China, ICTE.
- SPICKERMANN, A., GRIENITZ, V., VON DER GRACHT, H. A., 2014, "Heading towards a multimodal city of the future?: Multi-stakeholder scenarios for urban mobility", *Technological Forecasting and Social Change*, v. 89, [s. n.], pp. 201-221.
- STERMAN, J., 2000, *Business Dynamics: System Thinking and Modelling for a Complex World*. New York, USA, McGraw-Hill.
- STERMAN, J. D., 2001, "System Dynamics Modeling: Tools for Learning in a Complex World", *California Management Review*, v. 43, n. 4, pp. 7-25.
- SUDÁRIO, N. C. S., HERNADEZ, I. R. S. O., 2014, "Planos de Mobilidade Urbana, seus princípios e desafios: Relatos da experiência de elaboração do PLANMOB no município de São Sebastião do Paraíso - MG", *Cadernos da Fucamp*, v. 13, n. 19, pp. 1-17.
- SUM4ALL™ – SUSTAINABLE MOBILITY FOR ALL, 2017, "Global Mobility Report 2017: Tracking Sector Performance". Disponível em:

- <<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/28542/120500.pdf>>. Acesso em 10 out. 2018.
- SUPERVIA, 2016, *Quem Somos*. Disponível em: <<http://www.supervia.com.br/pt-br/quem-somos>>. Acesso em: 4 jul. 2018.
- TOMTOM, 2017, *TomTom Traffic Index: Measuring congestion worldwide*. Disponível em:
<https://www.tomtom.com/en_gb/trafficindex/list?citySize=LARGE&continent=ALL&country=ALL>. Acesso em: 6 jul. 2018.
- VAFA-ARANI, H., JAHANI, S., DASHTI, H., HEYDARI, J., MOAZEN, S., 2014, "A system dynamics modeling for urban air pollution: A case study of Tehran, Iran", *Transportation Research Part D*, v. 31, n. 2, pp. 21-36.
- VASCONCELLOS, E. A., MENDONÇA, A., 2010, "Política Nacional de Transporte Público no Brasil: organização de implantação de corredores de ônibus", *Revista de Transportes Públicos - ANTP*, v. 33, n. 3, pp. 73-95.
- VELOSO, S., SANTIAGO, V., 2017, *Ninguém entra, ninguém sai: mobilidade urbana e direito à cidade no Complexo do Alemão*. Rio de Janeiro, Fundação Heinrich Böll.
- VENTANA SYSTEMS, 2015, *Free Downloads*. Disponível em: <<http://vensim.com/free-download/>>. Acesso em: 17 jul. 2018.
- VENTER, C., 2016, *Developing a Common Narrative on Urban Accessibility: A Transportation Perspective*. Washington, D.C. USA, Brookings Institution.
- VLT CARIOCA, 2018a, *Sobre o VLT*. Disponível em: <<http://www.vltrio.com.br>>. Acesso em: 4 jul. 2018.
- VLT CARIOCA, 2018b, Informações disponibilizadas pela ouvidoria do VLT Carioca.
- VICTORIA TRANSPORT POLICY INSTITUTE – VTPI, 2014, "About this Encyclopedia", *Online TDM Encyclopedia*. Disponível em: <<http://www.vtpi.org/tdm/tdm12.htm>>. Acesso em: 26 abr. 2018.
- VTPI – VICTORIA TRANSPORT POLICY INSTITUTE, 2015, "Light Rail Transit", *Online TDM Encyclopedia*. Disponível em: <<http://www.vtpi.org/tdm/tdm121.htm>>. Acesso em: 04 jul. 2018.
- VTPI – VICTORIA TRANSPORT POLICY INSTITUTE, 2017, "Accessibility: Evaluating people's to reach desired goods, services and activities", *Online TDM Encyclopedia*. Disponível em: <<http://www.vtpi.org/tdm/tdm84.htm>>. Acesso em: 26 abr. 2018.

- WANG, J., LU, H., PENG, H., 2008, "System Dynamics Model of Urban Transportation System and Its Application", *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, v. 48, n. 3, pp. 83-89.
- WEN, L., BAI, L., 2017, "System Dynamics Modeling and Policy Simulation for Urban Traffic: a Case Study in Beijing", *Environmental Modeling & Assessment*, v. 22, n. 4, pp. 363-378.
- WIRJODIRDJO, B., AMELIA, P., FANANI, A. A., 2014, "A system dynamic model of train revitalization toward sustainable urban transportation system in Surabaya-Indonesia", *Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 9, n. 11, pp. 2068-2073.
- WRIGHT, L., HOOK, W., 2007, *Bus Rapid Transit guide*, 3 ed., Institute for Transportation and Development Policy, New York, USA.
- YANG, Y., ZHANG, P., NI, S., 2014, "Assessment of the Impacts of Urban Rail Transit on Metropolitan Regions Using System Dynamics Model", *Transportation Research Procedia*, v. 4, [s. n.], pp. 521-534.
- YAO, H., CHEN, D., 2015, "A system dynamics model for urban sustainable transportation planning". In: *International Conference on Geoinformatics*, pp. 1-5, Wuhan, China, Geoinformatics.
- YORK, T. A., BRENT, A. C., MUSANGO, J. K., KOCK, I. H., 2017, "Infrastructure implications of a green economy transition in the Western Cape Province of South Africa: A system dynamics modelling approach". *Development Southern Africa*, v. 34, n. 5, pp. 529-547.
- XAVIER, J. C., BOARETO, R., 2005, "The implementation of Brazil Sustainable Mobility Policy". In: *International Conference Series on Competition and Ownership in Land Passenger Transport*, pp. 1-12, Sydney, Thredbo 9.
- ZAGONEL, A. A., CORBET, T. F., 2006, "Levels of Confidence in System Dynamics Modeling: A Pragmatic Approach to Assessment of Dynamic Models". In: *Proceedings of the International Conference of the System Dynamics Society*, pp. 1-19, Nijmegen, The Netherlands.

APÊNDICE A – PROJEÇÃO POPULACIONAL PELO MÉTODO AIBI

Utilizando as projeções da taxa de crescimento da população do Estado do Rio de Janeiro para o período de 2010 - 2060 (IBGE, 2018), obteve-se uma estimativa da população total deste estado para o intervalo em questão. Baseado em Lins *et al.* (2013), a projeção da população do município do Rio de Janeiro foi obtida por meio da seguinte equação:

$$Pop_{TOT/MUN}(t) = a_i Pop_{TOT/UF}(t) + b_i$$

Onde:

- $POP_{TOT/MUN}(t)$ é a população residente total estimada, na época t , para o Município do Rio de Janeiro;
- $POP_{TOT/UF}(t)$ é a população residente total estimada, na época t , para a Unidade da Federação do Rio de Janeiro;
- $a_i = \frac{Pop_{TOT/MUN}(2010) - Pop_{TOT/MUN}(2000)}{Pop_{TOT/UF}(2010) - Pop_{TOT/UF}(2000)}$;
- $b_i = Pop_{TOT/MUN}(2000) - a_i Pop_{TOT/UF}(2000)$;
- $POP_{TOT/MUN}(2000)$ é a população residente total verificada no Censo Demográfico de 2000 (IBGE) para o Município do Rio de Janeiro;
- $POP_{TOT/MUN}(2010)$ é a população residente total verificada no Censo Demográfico de 2010 (IBGE) para o Município do Rio de Janeiro;
- $POP_{TOT/UF}(2000)$ é a população residente total verificada no Censo Demográfico de 2000 (IBGE) para a Unidade da Federação do Rio de Janeiro; e
- $POP_{TOT/UF}(2010)$ é a população residente total verificada no Censo Demográfico de 2010 (IBGE) para a Unidade da Federação do Rio de Janeiro.

O método AiBi foi aplicado para os anos de 2017 a 2050. Com base na estimativa da população foi possível projetar a taxa de crescimento anual da população da cidade do Rio de Janeiro para os anos entre 2018 e 2050.

APÊNDICE B – OBTENÇÃO DAS CURVAS S-SHAPED

As funções sigmóides apresentam o crescimento de algum fator em um intervalo de tempo. Essas funções possuem esse nome devido ao formato de “S” que os seus gráficos possuem. Entre as diversas funções sigmóides, neste trabalho a função utilizada foi:

$$Y = a \times \tanh(bx + c) + d$$

Para a atratividade do modo não motorizado, a curva foi construída com base na projeção de Perkins+Will (2018) que afirma que, sob implementação de políticas de mobilidade urbana, o percentual de viagens com o modo não motorizado atingirá 35% em 2050. De acordo com Prefeitura do Rio de Janeiro (2014), este percentual para cidade Rio de Janeiro é de 28%. Para a construção da curva, foram considerados três cenários políticos: sem implementação da PNMU; com a aplicação incompleta da PNMU; e com extrema interferência política. Deste modo, temos que $f(0) = 0,28$ e $f(1) = 0,35$. Para representar o cenário de aplicação incompleta da PNMU, adotou-se um ponto médio entre $f(0)$ e $f(1)$ e, por isso, $f(0,5) = 0,315$.

Considerando a função tangente hiperbólica limitada entre -1 e 1, para a relação entre o grau de implementação da PNMU e a situação do transporte não motorizado, tem-se:

$$\text{I. } a \times (-1) + d = 0,28$$

$$\text{II. } a \times (1) + d = 0,35$$

Logo,

$$2d = 0,28 + 0,35 \therefore d = \frac{0,63}{2} = 0,315;$$

$$2a = 0,35 - 0,28 \therefore a = \frac{0,07}{2} = 0,035 .$$

Na equação sigmóide adotada, o coeficiente b determina a inclinação da curva. Adotando $b = 10$ e sendo $a = 0,035$, $F(0,5) = 0,315$ e $d = 0,315$, tem-se que:

$$F(x) = a \times \tanh(bx + c) + d$$

$$F(0,5) = 0,035 \times \tanh(10 \times (0,5) + c) + 0,315$$

$$0,315 = 0,035 \times \tanh(10 \times (0,5) + c) + 0,315$$

$$\frac{0,315 - 0,315}{0,035} = \tanh(5 + c)$$

$$5 + c = \text{ArcTanh}[0]$$

$$c = \text{ArcTanh}[0] - 5$$

$$c = -5$$

Logo,

$$Y = 0,035 \times \tanh(10x - 5) + 0,315$$

De maneira análoga a atratividade do modo não motorizado, utilizou-se a projeção SuM4All™ (2017) para a construção da curva da atratividade do transporte público. De acordo com esta projeção, em 20 anos de implementação de políticas orientadas para o transporte público, a participação do transporte individual no mundo passaria de 74,46% para 50%, ou seja, uma redução de aproximadamente 33%. De acordo com a Prefeitura do Rio de Janeiro (2014), a participação do transporte individual é de 34%. Sendo assim, uma redução de 33% resultaria em um total de 22,83% realizadas por este modo. Dada esta adaptação da projeção da SuM4All™ (2017) para a cidade do Rio de Janeiro, tem-se que o percentual de viagens com transporte público realizadas no cenário sem implementação da PNMU ($f(0)$) e no cenário com extrema interferência política ($f(1)$) é de 66% e 77,17%, respectivamente. Assim como na curva da atratividade do modo não motorizado, adotou-se um ponto médio entre $f(0)$ e $f(1)$ para representar o cenário de aplicação incompleta da PNMU e, por isso, $f(0,5) = 71,585\%$.

Considerando a função tangente hiperbólica entre -1 e 1, para a relação entre o grau de implementação da PNMU e a situação do transporte público, tem-se:

$$\text{III. } a \times (-1) + d = 0,66$$

$$\text{IV. } a \times (1) + d = 0,7717$$

Logo,

$$2d = 0,66 + 0,7717 \therefore d = \frac{1,4317}{2} = 0,71585;$$

$$2a = 0,7717 - 0,66 \therefore a = \frac{0,1117}{2} = 0,05585 .$$

Adotando $b = 10$ e sendo $a = 0,05585$, $F(0,5) = 0,71585$ e $d = 0,71585$, tem-se que:

$$F(x) = a \times \tanh(bx + c) + d$$

$$F(0,5) = 0,05585 \times \tanh(10 \times (0,5) + c) + 0,71585$$

$$0,71585 = 0,05585 \times \tanh(10 \times (0,5) + c) + 0,71585$$

$$\frac{0,71585 - 0,71585}{0,05585} = \tanh(5 + c)$$

$$5 + c = \text{ArcTanh}[0]$$

$$c = \text{ArcTanh}[0] - 5$$

$$c = -5$$

Logo,

$$Y = 0,05585 \times \tanh(10x - 5) + 0,71585$$

APÊNDICE C – TESTE DE ERRO DE INTEGRAÇÃO

Neste trabalho foi utilizado o método de integração Euler. Conforme discutido no Capítulo 3, os erros deste método são irrelevantes em modelos de sistemas humanos e sociais. Além disso, este método é comumente utilizado para simulação numérica devido a sua simplicidade e adequação para diversas aplicações.

Para realizar o teste de erro de integração adota-se uma estimativa inicial para dt (*time step*). Após simular o modelo com essa estimativa, deve-se reduzir o valor de dt ao meio e executar o modelo novamente. Em seguida, deve-se comparar os dois resultados obtidos e verificar se existe diferença significativa entre os mesmos. Se o comportamento é alterado significativamente, deve-se repetir o teste reduzindo-se o dt ao meio novamente até que os resultados não apresentem uma variação significativa (Sterman, 2000).

A estimativa inicial para o *time step* foi de um ano. Como pode ser visto na Tabela C.1, ao reduzir o dt para 0,5 (meio ano) obteve-se uma variação inferior a 0,4% durante os 32 anos de simulação. Sendo assim, considerou-se que a mudança no comportamento da variável não é significativa e, por isso, adotou-se um *time step* de 1 ano.

Tabela C.1 – Nível de Congestionamento para diferentes valores de *Time Step*

Ano	<i>Time Step</i>		Variação	Ano	<i>Time Step</i>		Variação
	1 ano	0,5 ano			1 ano	0,5 ano	
2018	1,43805	1,43805	0,00%	2035	1,173580	1,172360	0,10%
2019	1,44481	1,44474	0,00%	2036	1,095450	1,094210	0,11%
2020	1,451290	1,451160	0,01%	2037	1,037550	1,036270	0,12%
2021	1,457480	1,457280	0,01%	2038	0,999964	0,998622	0,13%
2022	1,463100	1,462830	0,02%	2039	0,977467	0,976042	0,15%
2023	1,468340	1,467990	0,02%	2040	0,964450	0,962924	0,16%
2024	1,473120	1,472700	0,03%	2041	0,956815	0,955171	0,17%
2025	1,477310	1,476800	0,03%	2042	0,952022	0,950246	0,19%
2026	1,480620	1,480030	0,04%	2043	0,948612	0,946692	0,20%
2027	1,482560	1,481880	0,05%	2044	0,945782	0,943702	0,22%
2028	1,482210	1,481440	0,05%	2045	0,943093	0,940840	0,24%
2029	1,477890	1,477030	0,06%	2046	0,940308	0,937864	0,26%
2030	1,466730	1,465770	0,07%	2047	0,937293	0,934643	0,28%
2031	1,444190	1,443160	0,07%	2048	0,933973	0,931097	0,31%
2032	1,404390	1,403280	0,08%	2049	0,930299	0,927177	0,34%
2033	1,342830	1,341660	0,09%	2050	0,926240	0,922849	0,37%
2034	1,261700	1,260500	0,10%				

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE D – TESTE DE CONDIÇÃO EXTREMA

O teste de condição extrema verifica se o comportamento do modelo proposto é similar ao comportamento do sistema real quando submetido a condições extremas. Portanto, esse teste consiste em atribuir um valor extremo a um determinado parâmetro e comparar o comportamento gerado pelo modelo com um comportamento observado ou antecipado do sistema real sob a mesma condição (Ho, 2015). Neste trabalho considerou-se três condições extremas: taxa de crescimento da população igual a zero, número médio de pessoas por veículo igual a cinco e taxa média de viagens diárias igual a quatro.

Considerando uma taxa de crescimento igual a zero, temos que a população se permanece constante ao longo dos anos, como pode ser visto na Figura D.1(a). Além disso, como esperado, temos que o número total de viagens também permanece constante durante toda a simulação, como pode ser visto na Figura D.1(b).

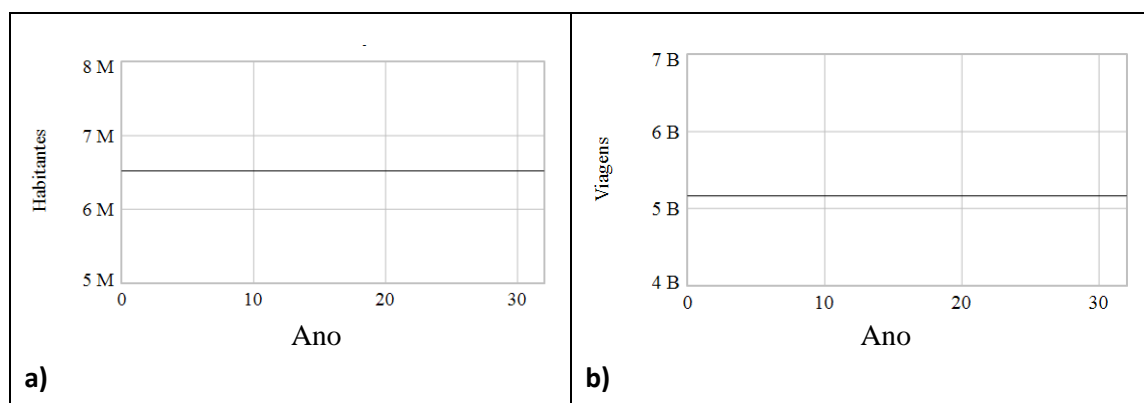


Figura D.1 – Tamanho da população (a) e número total de viagens (b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A taxa de crescimento da população igual a zero impacta também no nível de congestionamento e no indicador RTR. Essa condição extrema faz com que o número de viagens não cresça ao longo dos anos e, por isso, o nível de congestionamento ao final da simulação é menor, chegando a 0,88, como pode ser visto na Figura D.2(a). Com a expansão da infraestrutura somada ao não crescimento populacional tem-se que o indicador RTR cresce, conforme esperado. O comportamento desse indicador é apresentado na Figura D.2(b).

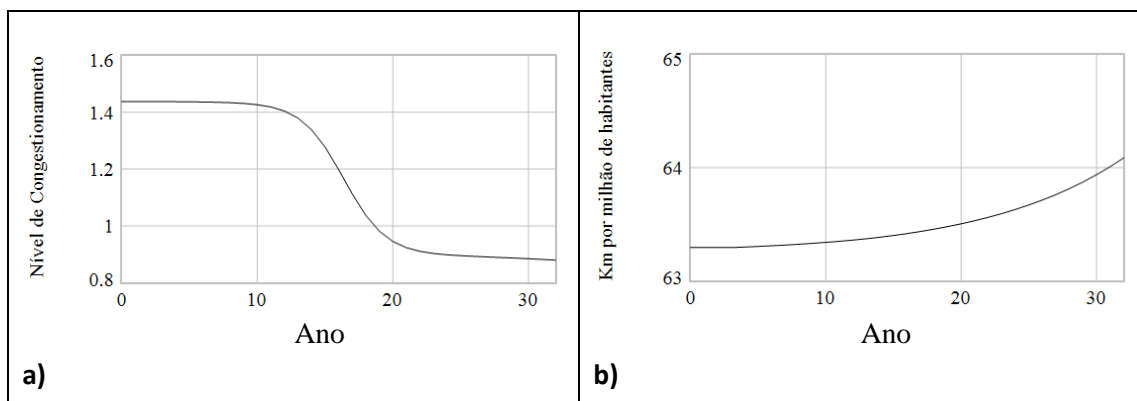


Figura D.2 – Nível de congestionamento (a) e RTR (b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

No submodelo Congestionamento, considerou-se uma ocupação média de cinco passageiros por veículo individual. Conforme pode ser visto na Figura D.3, o nível de congestionamento reduz em um terço ($1/3$), passando de 0,43 no ano 0 para 0,30 no ano 32. Apesar de ser praticamente impossível obter uma média de cinco pessoas por veículo, esse comportamento é esperado, uma vez que o aumento na ocupação média de veículos individuais reduz o número de veículos circulando no sistema e, conseqüentemente, reduz o nível de congestionamento.

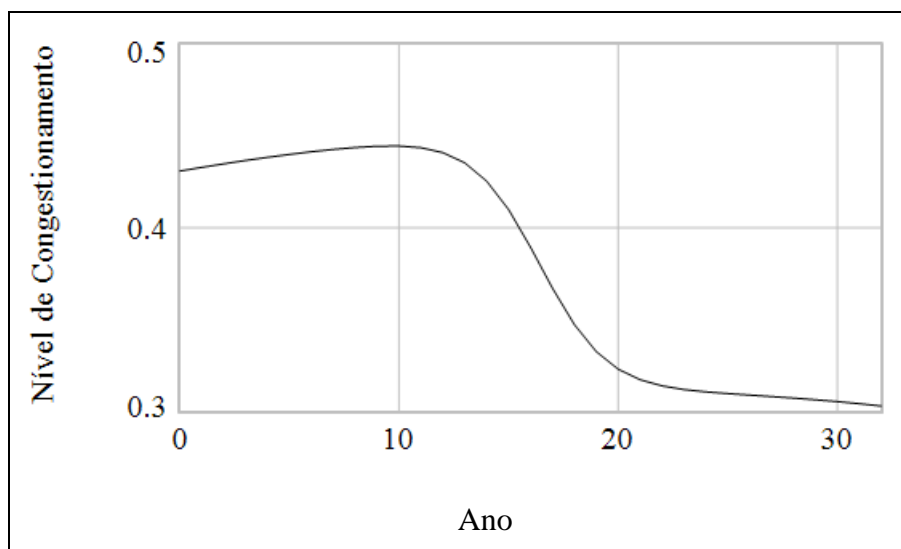


Figura D.3 – Nível de congestionamento para uma média de 5 pessoas por veículo individual

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, considerou-se um total de quatro deslocamentos diários por pessoa, ou seja, considerou-se, aproximadamente, o dobro da demanda de transporte real. Conforme esperado, este parâmetro extremo resulta em um sistema insustentável. O nível de congestionamento,

apresentado na Figura D.4(a), praticamente duplica e a emissão anual de CO₂ em 32 anos resulta em um acúmulo de 96,6 milhões de toneladas de CO₂. A mudança no comportamento da curva do acréscimo anual do CO₂, apresentada na Figura D.4(b), é justificada pela presença do congestionamento durante todo o período de simulação. Devido a elevada demanda de transporte, mesmo com a implementação total da PNMU, o sistema permanece com o nível de congestionamento superior a 1,00 e, por isso, a emissão de CO₂ é multiplicada por 1,2.

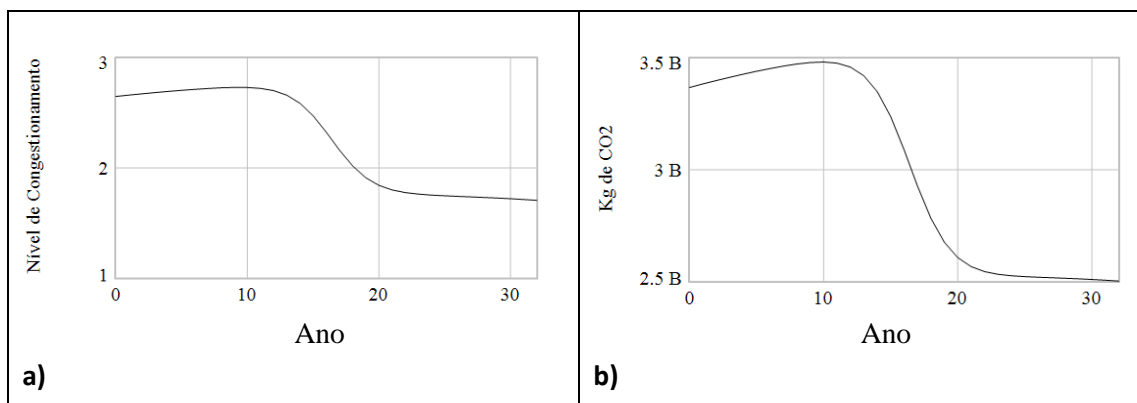
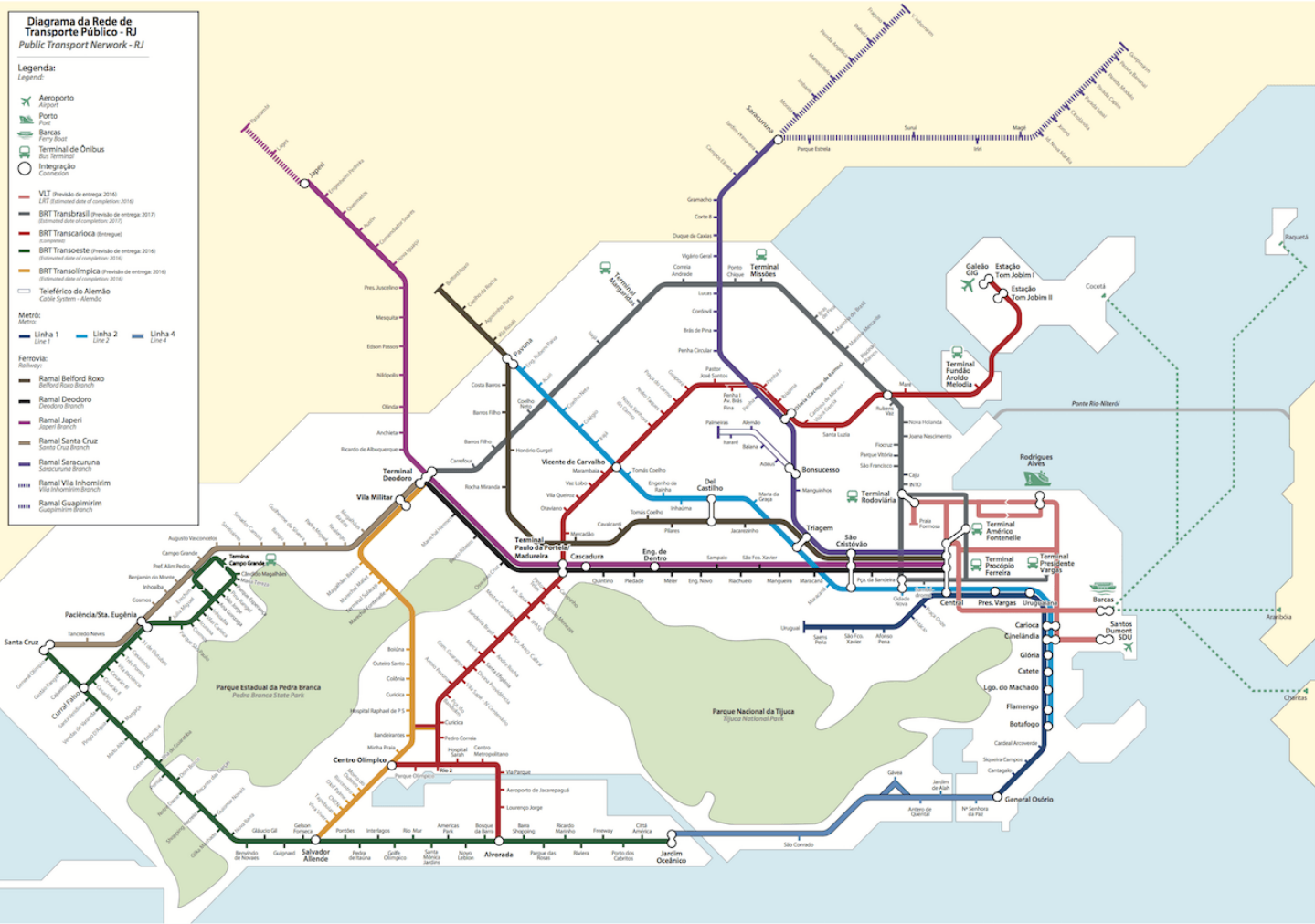


Figura D.4 – Nível de congestionamento (a) e acréscimo anual de CO₂ (b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, para todas as extremas condições estabelecidas obteve-se os comportamentos esperados. Com isso, esses resultados mostram que o modelo proposto representa o sistema real de maneira adequada, atestando a confiabilidade do mesmo.

ANEXO A – REDE DE TRANSPORTE DO RIO DE JANEIRO



Fonte: Prefeitura do Rio de Janeiro (2014).